

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA: INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:**

**“ANÁLISIS DE CAUDALES MEDIANTE LA TRANSFORMADA WAVELET  
CON APLICACIÓN A LA ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE LAS  
CENTRALES HIDROELÉCTRICAS NO REGULABLES”.**

**AUTOR:  
EDY FRANKLIN ALEMÁN QUIMBIULCO**

**DIRECTOR:  
JUAN CARLOS HERRERA HEREDIA**

**Quito, Febrero del 2015**

## **DECLARACIÓN**

Yo, EDY FRANKLIN ALEMÁN QUIMBIULCO con CC: 1710977305 autorizo a la Universidad Politécnica Salesiana, la publicación total o parcial de este trabajo de grado y su reproducción sin fines de lucro, de acuerdo a la normatividad institucional vigente.

Además declaro que los conceptos y análisis desarrollados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Quito DM, a 28 de Febrero del 2015

---

Sr. Edy Franklin Alemán Quimbiulco  
CC:1710977305

**CERTIFICA:**

Haber dirigido, revisado y verificado la ejecución de los análisis que componen los capítulos técnicos del presente trabajo de tesis: “Análisis de caudales mediante la transformada wavelet con aplicación a la estimación de la producción de las centrales hidroeléctricas no regulables”, realizada por el Sr. Edy Franklin Alemán Quimbiulco, previa a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico en la carrera de Ingeniería Eléctrica.

Por cumplir los requisitos autoriza su presentación.

Quito DM, a 28 de Febrero del 2015

---

Ing. Juan Carlos Herrera Heredia  
DIRECTOR DE TESIS

## **DEDICATORIA**

A DIOS. Principio y fin de lo que vivo.

A mis padres Manuel e Inés, como reconocimiento a su amor, dedicación y firmeza para con sus hijos, permitiendo que soñemos, nos equivoquemos y a pesar de eso, aun continúen a nuestro lado.

A mis hermanos, Sandra, David, Dolores y Jeaneth; por quienes decidí seguir esta locura a pesar de nuestras limitaciones.

A los amigos verdaderos, compañeros de aulas y personas que de una u otra manera me animaron a continuar.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar el más sentido agradecimiento a la Universidad Politécnica Salesiana, en especial a los gestores de la Carrera de Ingeniería Eléctrica del Campus Kennedy; que con principio cristiano, creyeron en el proyecto, abrieron sus puertas y brindaron a los trabajadores la oportunidad de acceder a una carrera universitaria.

Deseo reconocer y agradecer al Ing. Benigno Santos, Ing. Ramiro Robayo, Mat. Xavier González, Ing. Milton Toapanta (†), Ing. Víctor Orejuela, Ing. Renán Flores, Ing. Pedro Jarrín, Ing. Carlos Cifuentes, profesores que contribuyeron en mi formación y gusto por las ciencias.

Un agradecimiento especial a mi director de tesis el Ing. Juan Carlos Herrera que ha colaborado activamente conmigo y ha estado pendiente del desarrollo de la tesis hasta su presentación final.

Al Ing. Luis Panchi; excompañero y amigo, que desde su lado humano me ha motivado a continuar.

Al Ing. Luis Amaya, ex compañero, amigo y excelente ser humano que me ha orientado a buscar alternativas en el desarrollo de este trabajo.

Al personal de Secretaría de la Carrera de Ingeniería Eléctrica; Lcda. Gina Mora y Lcda. Verónica Barbosa quienes en todos estos años en los que he pasado en la universidad han sido diligentes en sus actividades, me han ayudado en cada desacierto y me han contagiado de su buen humor.

Para finalizar. A todos mis ex compañeros de clases y de las ramas estudiantiles del IEEE que tuve la oportunidad de conocer en mi actividad académica y que compartieron su amistad, sueños y experiencias.

## **RESUMEN**

El objetivo de este trabajo es presentar una metodología de análisis de caudales de agua a partir del uso de la transformada de Wavelet, cuyo resultado puede permitir tener en cuenta otra forma de entrada de datos, para la planificación en los sistemas de centrales hidroeléctricas de paso o de pasada. Se analizó varias familias que posee el modelo matemático de la transformada de Wavelet, para encontrar la más adecuada al modelo de estimación estadística que se usa en algunas áreas de planificación de energía eléctrica. Se empleó una herramienta que permitió comparar la descomposición de los datos según el tipo de familia seleccionada y, de acuerdo al ensayo del grupo de datos se estableció el nivel de descomposición idóneo. Para determinar la validez del análisis se estableció una comparación, entre los datos referenciales de los caudales de una central hidroeléctrica del país contra los obtenidos en el análisis de Wavelet. Frente a otros métodos empleados en el análisis de datos y estimación de la producción de energía. Se observó el comportamiento que cada uno aportó en el proceso de descomposición de datos para la estimación de la energía a partir del cambio en la entrada de datos.

## **ABSTRACT**

The object of this work is to present a methodology for analyzing water flows from the use of Wavelet Transform, where the result of the analysis can allow to consider a different input data for planning in non-regulated hydroelectric plant. Was analyzed, some families with the mathematical model of Wavelet Transform to find the most appropriate statistical estimation model, which is used in some areas of planning power. A tool that allowed us to compare the decomposition of the data by type of selected family and, according to test data group, the appropriate level of decomposition was established. To determine the validity of the analysis, a comparison between the reference data of the flow of water from a hydroelectric plant in the country was made from data obtained in the analysis of Wavelet. Compared to other methods were employed in data analysis and estimation of energy production. We observed the behavior that each contributed in the decomposition process data to estimate the electrical energy from the change in input data.

## INDICE

	DECLARACIÓN.....	I
	CERTIFICACION.....	II
	DEDICATORIA.....	III
	AGRADECIMIENTOS.....	IV
	RESUMEN.....	V
	ABSTRACT.....	VI
	INTRODUCCION .....	1
1	CENTRALES HICROELÉCTRICAS.....	2
1.1	Centrales de Agua Fluyente.....	2
1.2	Técnicas tradicionales de análisis de series temporales de caudales. ....	4
1.3	Estimación de la producción de centrales no regulables. ....	5
1.3.1	Determinación del caudal de equipamiento .....	6
1.3.2	Potencia a instalar y producción.....	10
2	TRANSFORMADA WAVELET (WT).....	11
2.1	Transformada Wavelet Continua (CWT).....	12
2.2	Transformada Wavelet Discreta (DWT).....	14
2.3	Aplicaciones de la Transformada Wavelet (WT) en el análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia.....	14
2.3.1	Calidad de energía.....	15
2.3.2	Descargas parciales. ....	17
2.3.3	Estimación de la demanda.....	17
2.3.4	Medidas de potencia.....	18
2.3.5	Protección de los sistemas eléctricos de potencia. ....	18
2.3.6	Transitorios en sistemas eléctricos de potencia.....	20
3	METODOLOGÍA DE ANÁLISIS MEDIANTE WAVELETS.....	23
3.1	Principios y algoritmos para determinación de la óptima wavelet madre.....	23
3.1.1	Transformada Wavelet.....	23
3.1.2	Familia de funciones .....	25
3.1.3	Haar.....	26
3.1.4	Daubechies .....	26
3.1.5	Symmlets.....	28
3.1.6	Sombrero Mexicano .....	28
3.1.7	Coiflets .....	29
3.1.8	Biortogonales .....	30
3.1.9	Morlet.....	33
3.1.10	Meyer .....	33
3.2	Transformada Wavelet Continua versus Discreta. ....	34



3.2.1	Clasificación de la transformada de Wavelet .....	34
3.2.2	Transformada Wavelet Continua (CWT). .....	34
3.2.3	Pasos para determinar la transformada de wavelet continua.....	34
3.3	Transformada Wavelet semidiscreta.....	38
3.4	Transformada Wavelet discreta. ....	39
3.4.1	Ejemplo de aplicación de la CWT.....	39
3.5	Desarrollo de la herramienta de análisis de caudales mediante Wavelets. ....	47
3.5.1	Aplicaciones generales de MATLAB .....	50
3.5.2	Vectores y Matrices.....	51
3.5.3	Toolbox de MATLAB.....	54
4	APLICACIÓN DEL MODELO .....	57
4.1	Descripción de emplazamientos y series de caudales. ....	57
4.1.1	Construcción y validación de una base datos de caudales: .....	58
4.1.1.1	Análisis Espacial .....	59
4.1.1.2	Análisis Temporal .....	59
4.2	Análisis espectral de la series de caudales y representación. ....	59
4.3	Análisis de desviaciones con otras metodologías. ....	64
4.3.1	Proceso Estocástico .....	64
4.3.2	Simulación Cualitativa (Qualitative Simulation) .....	65
4.3.2.1	Series temporales .....	65
4.3.3	Estadística descriptiva comparada con Wavelet .....	66
4.3.4	Análisis de los datos por método estadístico estocástico para la Central Agoyán ..	67
4.4	Aplicación a la estimación de producción de electricidad. [Por el autor] .....	69
4.4.1	Análisis del emplazamiento con los datos obtenidos con Wavelet .....	69
4.4.2	Comparación de datos de estimación energética.....	73
4.4.3	Resultados de los últimos años de energía eléctrica obtenida.....	74
5	CONCLUSIONES.....	75
6	RECOMENDACIONES .....	76
7	REFERENCIAS .....	77
8	ANEXOS .....	82
8.1	Resumen Mensual de Caudales.....	82
8.2	Consideraciones para el rendimiento. ....	83
8.3	Datos de lavado de embalse. ....	84
8.4	Corrida de datos con otro tipo de familias Wavelet. ....	85

## INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Aprovechamiento del caudal del río de montaña. [3] .....	3
Gráfico 2. Compuerta radial. [3] .....	3
Gráfico 3. Direccionamiento al generador en bajos niveles.[3] .....	4
Gráfico 4. Históricos de caudales. [6] .....	7
Gráfico 5. Curva característica de caudales. [7].....	8
Gráfico 6. Curva de caudales clasificados. [7].....	8
Gráfico 7. Traslación de una wavelet madre. [61].....	23
Gráfico 8. Función Seno a diferentes escalas. [61] .....	24
Gráfico 9. Diferencia de escala grande y escala pequeña en una señal .....	24
Gráfico 10. Familia Haar. [61].....	26
Gráfico 11. Familia Daubechies de orden 5 (db5). [61] .....	27
Gráfico 12. Wavelet Daubechies de orden 2 (db2). [61] .....	27
Gráfico 13. Familia Daubechies de orden 2 al 10. [61].....	27
Gráfico 14. Wavelet Symmlet de orden 2 al 8 [61] .....	28
Gráfico 15. Wavelet Sombrero Mexicano. [61].....	29
Gráfico 16. Familia Coiflet de orden 1 (coif1). [61] .....	29
Gráfico 17. Wavelet Coiflet de orden 1 al 5. [61] .....	30
Gráfico 18. Familia Biortogonal de orden 3.9 (Nr. Nd). [61] .....	31
Gráfico 19. Familias Biortogonales utilizados en MATLAB. [61] .....	32
Gráfico 20. Wavelet Morlet. [61].....	33
Gráfico 21. Función Meyer. [61] .....	33
Gráfico 22. Consecución grafica de la CWT. [61].....	34
Gráfico 23. Descomposición de la señal. [61] .....	35
Gráfico 24. Descomposición de la señal. [61] .....	35
Gráfico 25. Descomposición de la señal. [61] .....	35
Gráfico 26. Representación tridimensional. [64] .....	36
Gráfico 27. Señal no estacionaria de frecuencias 5 y 100 Hz. [65].....	37
Gráfico 28. Representación gráfica de diferente ángulo. [61] .....	37
Gráfico 29. Transformada wavelet continua vista otro diferente ángulo. [65].....	38
Gráfico 30. Forma de cálculo de la CWT para $s = 0.0001$ de la función wavelet y distintos valores de $\tau$ . [66] .....	42
Gráfico 31. Forma de cálculo de la CWT para $s = 0.002$ de la función wavelet y distintos valores de $\tau$ . [66] .....	43
Gráfico 32. Forma de cálculo de la CWT para $s = 0.004$ de la función wavelet y distintos valores de $\tau$ . [66].....	43
Gráfico 33. Señal no estacionaria de 10, 25, 50 y 100 Hz. [66].....	44
Gráfico 34. Transformada wavelet continua de la señal del Gráfico. 30. [66].....	45
Gráfico 35. Transformada wavelet continua de la señal de la Fig. 30 con ángulo de giro adecuado para mejor visualización. [66] .....	46
Gráfico 36. Acceso a la descarga del trial [Por el autor].....	50
Gráfico 37. Caudal diario total [Por el autor].....	58
Gráfico 38. Ventana de comando de MatLab. [Por el autor] .....	59
Gráfico 39. Cuadro de selecciones.....	60
Gráfico 40. Selección de función. [Por el autor].....	60
Gráfico 41. Ventana de despliegue de selección de análisis. [Por el autor].....	61
Gráfico 42. Despliegue de datos en programa. [Por el autor] .....	61
Gráfico 43. Despliegue de aproximaciones y descomposiciones. [Por el autor] .....	62
Gráfico 44. Aproximación A5. [Por el autor] .....	62

Gráfico 45. Despliegue análisis Wavelet DMeyer. [Por el autor].....	63
Gráfico 46. Señal recuperada de Wavelet Meyer. [Por el autor] .....	63
Gráfico 47. Series Real comparadas con Wavelet Meyer. [Por el autor].....	66
Gráfico 48. Curva de permanencia del caudal. [Por el autor] .....	68
Gráfico 49. Curva de capacidad óptima del sistema de generación.....	69
Gráfico 50. Curva de permanencia con datos entregados por Wavelet. [Por el autor] .....	71
Gráfico 51. Nueva Curva de capacidad del sistema de generación. [Por el autor] .....	71
Gráfico 52. Determinación de la duración de caudales. [Por el autor] .....	73
Gráfico 53: Wavelet Haar. [Por el autor] .....	85
Gráfico 54. Wavelet Daubechies. [Por el autor] .....	85
Gráfico 55. Wavelet Symmlets. [Por el autor].....	86

## INDICE DE TABLAS:

Tabla 1. Clasificación de Potencias según Central .....	6
Tabla 2. Tipos de turbinas .....	9
Tabla 3. Ordenes biortogonales.....	30
Tabla 4. Resumen estadístico de datos históricos .....	58
Tabla 5. Tabla de comparaciones.....	67
Tabla 6. Datos de análisis de emplazamiento de la central Agoyán .....	67
Tabla 7. Estadística de los valores tomados de la central .....	68
Tabla 8. Datos de análisis de emplazamiento con Wavelet .....	70
Tabla 9. Análisis de la representación Wavelet .....	70
Tabla 10. Cálculos de caudal y estimación de energía.....	72
Tabla 11. Energía eléctrica anual – serie histórica.....	73
Tabla 12. Datos estadísticos a partir del 2011.....	74
Tabla 13. Resumen de datos.....	82

## INTRODUCCIÓN

La producción de las centrales hidroeléctricas no regulables (denominadas también “de paso”, “de pasada”, “filo de agua”, etc.) depende directamente de su caudal de ingreso. Usualmente se dispone de mediciones de caudal de varios años y es necesario modelar su comportamiento con el fin de estimar la producción energética de las centrales con fines de planificación de la operación del sistema eléctrico.

Los caudales se pueden asimilar a una serie temporal ligada a procesos aleatorios. Es posible analizar esta serie temporal mediante diversas técnicas matemáticas clásicas, tales como el Modelo Autoregresivo Integrado de Media Móvil (ARIMA) o el Análisis Multifractal (AM) o utilizar herramientas estadísticas simples.

La transformada Wavelet para el procesamiento de datos constituye una alternativa válida para analizar la información preservando los fenómenos locales, el tratamiento de series no periódicas y multiescala. Esta técnica posee ventaja sobre el análisis espectral clásico, puesto que permite el observar eventos en diferentes rangos de frecuencia, variabilidad temporal y no requiere de una serie estacionaria.

Dado que la mayoría de datos hidrológicos presenta un comportamiento no periódico, la aplicación de metodologías de representación de la serie tales como el espectro de potencia de Fourier, comúnmente lleva a resultados con importantes niveles de inexactitud.

En este contexto, la transformada Wavelet se constituye en una alternativa más robusta para el análisis de la herramienta de señal de frecuencia, al representar la serie hidrológica empleando funciones que permiten identificar la frecuencia y la ubicación en el tiempo. Esto conlleva con herramientas adecuadas a estimar flujos de agua en el futuro.

El empleo de la transformada Wavelet permitiría aplicar un enfoque diferente al análisis de los caudales de ingreso a las centrales hidroeléctricas no regulables y a la estimación de la producción de energía eléctrica.

## **CAPITULO I**

### **1 CENTRALES HICROELÉCTRICAS**

#### **1.1 Centrales de Agua Fluyente**

La energía hidráulica es aprovechable gracias a los efectos naturales observados en el ciclo hidrológico. Realizando una descripción cualitativa, el sol junto con la gravedad juegan un papel importante, en su inicio el sol proporciona la energía suficiente para la evaporación de agua, el desplazamiento del vapor de agua resultado del primer efecto se transportará por medio del movimiento de masas de aire (viento), mientras el vapor de agua bajo condiciones meteorológicas se condensa formando nubes y con esto, el ciclo termina en la precipitación. [1]

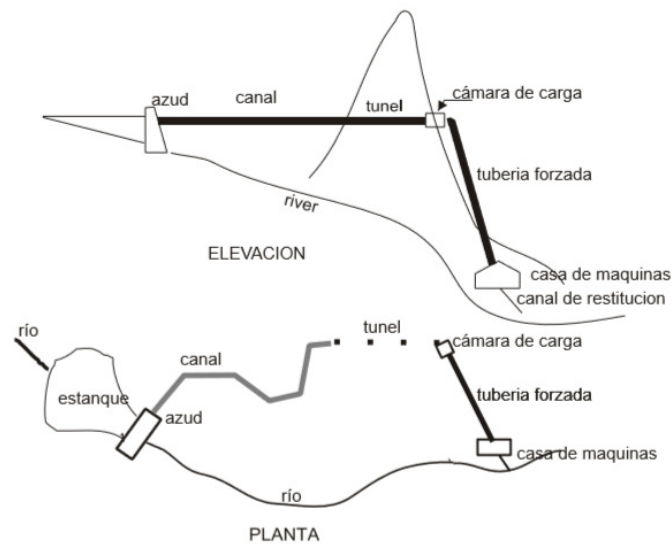
Dentro de los sistemas hídricos de generación eléctrica que se pueden encontrar, se tienen aquellas que aprovechan la acumulación de agua en un estanque, manteniendo su energía potencial; hasta su liberación, conocida como de embalse; así también, otro tipo de central hidroeléctrica aprovecha la energía cinética que tiene la corriente de agua de los ríos y a la que se le conoce como tipo de central de pasada o no regulable. [2]

La idea principal de los recursos hídricos donde se aprovecha la energía cinética es que puedan aprovechar su afluencia para la generación eléctrica.

Las centrales de agua fluyente no poseen un embalse donde se puede almacenar el agua, por el contrario aprovecha el caudal hídrico de los ríos para mantener en funcionamiento a la central eléctrica mientras el nivel supere el mínimo requerido, caso contrario el sistema se detendrá una vez que este caudal sea escaso y no pueda mover las turbinas del generador eléctrico.

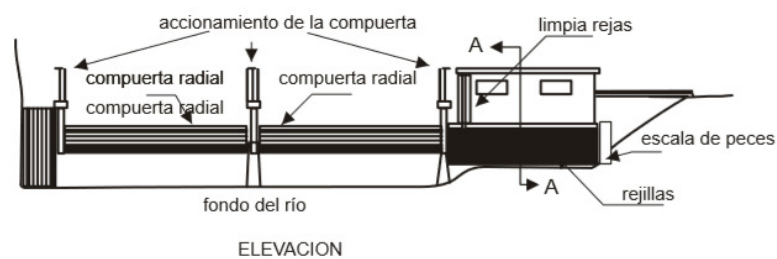
Este tipo de centrales de agua fluyente pueden ser diferenciadas según la topografía del terreno. Encontraremos aquellas de mediana y alta caída de agua y gran caudal donde se puede colocar una pequeña represa de poca altura,

suficiente como para dirigir el agua por medio de una tubería a la sala de máquinas. El problema de este sistema es que la tubería que se usa en este tipo de central es costosa. Gráfico. 1. Una buena alternativa es llevar el agua a través de un canal aprovechando la topografía del terreno como para que el caudal no sea excesivo y luego de la cámara de carga dirigir por una tubería a la casa de máquinas.



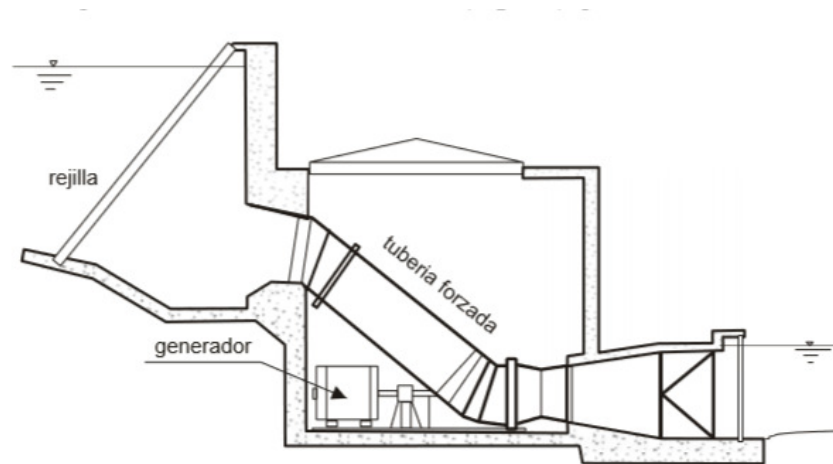
**Gráfico 1.** Aprovechamiento del caudal del río de montaña. [3]

Por otro lado en aquellos sitios donde no se dispone de altura de salto la alternativa puede ser utilizar compuertas radiales Gráfico. 2 con un diseño específico a la topografía del sitio y donde debería implementar una escalera de peces para salvaguardar la naturaleza.



**Gráfico 2.** Compuerta radial. [3]

Si en un río existe una caída mínima se puede aprovechar para llevar directamente mediante un canal a la central. Gráfico. 3. [3]



**Gráfico 3.** Direccionamiento al generador en bajos niveles.[3]

## 1.2 Técnicas tradicionales de análisis de series temporales de caudales.

El fenómeno natural de la “llegada de avenidas” a un determinado punto de un río varía en frecuencia y magnitud, esto ocasiona que el caudal esté determinado por el azar y siendo; por lo tanto, imposible de predecir de forma determinística. De esta forma, el objeto fundamental del cálculo o estimación del caudal, como el de la mayoría de los estudios hidrológicos de crecidas, consiste en caracterizar estadísticamente dicho fenómeno mediante el conocimiento de su ley de frecuencia o, lo que es lo mismo, con su probabilidad anual de ocurrencia.

En consecuencia, la determinación de dicho método es un problema fundamentalmente estadístico y debe ser; efectivamente, abordado mediante la aplicación de las técnicas que ofrece dicho método. Dado que la estadística se ocupa del tratamiento de los datos para, en base a ellos, tomar decisiones y realizar predicciones, es fundamental disponer de mediciones directas del fenómeno aleatorio en esta clase de estudios para que sus técnicas puedan ser aplicadas, siendo crítica la calidad y extensión de los datos disponibles en la fiabilidad de los resultados obtenidos. El estudio entonces, parte del análisis detallado de la información foronómica sobre caudales de que se disponga en la



cuenca.

También, con el objetivo de aumentar el número de estaciones disponibles, y aunque el dato realmente necesario para el análisis es el caudal instantáneo; es decir, el máximo caudal alcanzado durante las crecidas, se selecciona también estaciones en las que en todo o en parte de su registro solo se disponía del caudal medio diario. En estos casos se han transformado los caudales medios diarios en sus correspondientes caudales instantáneos. Esta decisión ha llevado a considerar las series temporales medidas en los embalses (en los que únicamente se mide el caudal medio diario) y no sólo las registradas en las estaciones de aforo.

Otro aspecto a considerar en este tipo de estudios es la posible alteración del funcionamiento natural de la cuenca por causas antrópicas, lo que provoca que el caudal medido sea el resultado de dichas alteraciones y que, por tanto, difiera del que habría circulado por el río de no existir dichas causas. En general, la única infraestructura hidráulica capaz de alterar de forma significativa los caudales de avenida son las presas de cierta importancia, por lo que es ese tipo de infraestructura la que hay que tener en cuenta para analizar la posible alteración del régimen natural de la cuenca. [4]

En conclusión, es fundamental la elección de un caudal de diseño adecuado para definir el equipamiento a instalar, de forma que la energía producida sea la máxima posible en función de la hidrología. Así, el conocimiento del régimen de caudales del río en la zona próxima a la toma de agua es imprescindible para la determinación del caudal de diseño del aprovechamiento. La medición de los caudales del río se realiza en las estaciones de aforo, donde se registran los caudales instantáneos que circulan por el tramo del río donde está ubicada la estación y a partir de estos se determinan los caudales máximos, medios y mínimos diarios correspondientes a un gran número de años, con los que se elaboran series temporales agrupadas por años hidrológicos. [5]

### 1.3 Estimación de la producción de centrales no regulables.

La característica común a todas las centrales de agua fluyente cabe recordar, es que dependen directamente de la hidrología, porque no tienen capacidad de regulación del caudal turbinado y éste es muy variable. Estas centrales cuentan con un salto útil prácticamente constante y su potencia depende directamente del caudal que pasa por el río. En algunos casos se construye una pequeña presa en la toma de agua para elevar el plano y facilitar su entrada al canal o tubería de derivación.

No existe consenso para definir la pequeña hidráulica. Los criterios utilizados pueden variar de país a país, de acuerdo a la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) la potencia instalada son:

Potencia (kW)	Tipo
0 – 50	Micro central
50 – 500	Mini central
500 – 5000	Pequeña central

**Tabla 1.** Clasificación de Potencias según Central

Pequeña central hidroeléctrica = todo aprovechamiento con una potencia instalada menor o igual a 5 MW.

Los parámetros de diseño de una pequeña central; como la central no regulada, depende como otras del salto (en aquellas que se eleven según la topografía) como del caudal turbinado, por lo que es muy importante dimensionar adecuadamente estos parámetros tanto en las instalaciones así también los equipos que se usarán en este tipo de centrales.

Las centrales de energía eléctrica esencialmente requieren de dos elementos: Caudal de agua (Q) y carga (H).

### 1.3.1 Determinación del caudal de equipamiento

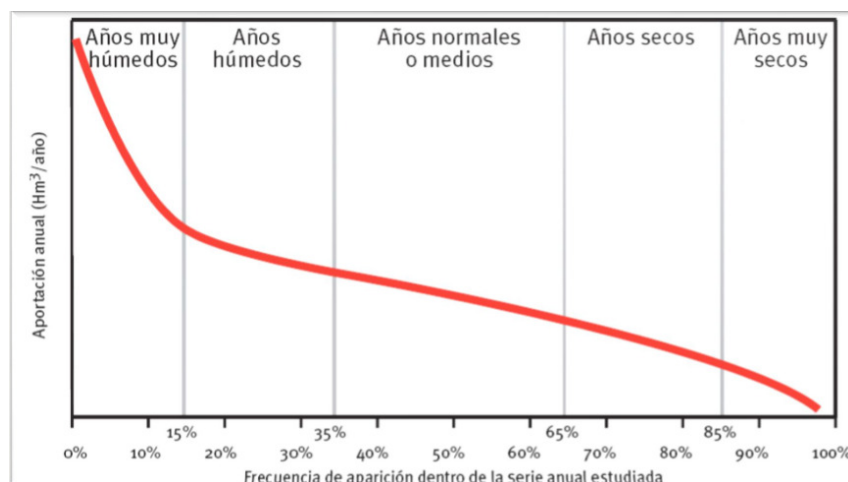
Es primordial la elección de un caudal de diseño adecuado para definir el equipamiento a instalar, de forma que la energía producida sea la máxima posible en función de la hidrología. Por tanto, el conocimiento del régimen de caudales del río en la zona próxima a la toma de agua es imprescindible para la determinación del caudal de diseño del aprovechamiento.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA SERIES DE DATOS HIDROLÓGICOS CAUDALES MEDIOS MENSUALES (m³/s)												
NOMBRE:	ESMERALDAS DJ SADE			CÓDIGO:	H168							
PERIODO:	1960-2010			LATITUD:	0°32'3" N			LONGITUD:	79°25'11" W			ELEVACIÓN: 51 m
AÑOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1965	1.521.321	2.038.964	2.349.036	1.899.651	1.223.461	663.337	823.159	624.878				
1966	1.739.184	1.737.561	1.837.633	1.310.316	1.322.665	621.288	423.890	328.354	289.008	533.658	348.542	463.848
1967	1.382.998	1.989.863	1.550.908	837.084	1.197.755	590.943	366.940	246.251	210.785	247.087	321.443	
1968	579.158	1.157.978	1.219.198	1.422.067	660.796	481.914	382.582	257.541	343.745	379.215	362.136	255.393
1969	857.466	1.117.530	1.691.871	1.584.391	300.147	461.517	590.210					
1970	983.498	1.563.850	1.364.640	1.163.226	933.073	434.143	316.328	311.855	299.207	454.075	546.281	
1971	1.107.246	1.880.501	2.211.961	836.795	767.511	417.033	443.507	404.441	618.223	392.400	524.297	
1972	1.086.253	1.912.728	1.846.926	1.516.678	316.249	1.573.761	903.832	692.525	613.960	727.086		
1973	2.626.401	2.035.675	928.118	461.862	529.832	498.639	306.087	394.223				
1974	722.135	1.623.638	1.493.752	1.259.484	1.135.132	582.699	393.043	255.532	304.023	539.638	457.947	818.314
1975	1.684.023	2.306.475										
1976	1.086.905	611.134	393.199	285.171	224.330	371.500	630.241					
1977	861.204	1.295.581	2.065.565	1.816.181	948.888	877.515	331.037	218.023	455.323			
1978	1.429.947	1.617.458	1.828.330	2.093.619	1.823.226	607.029	499.512	299.000	257.963	234.083	410.999	
1979	867.947	1.161.629	1.952.227	1.829.913	1.118.117	1.145.270	470.801	332.501	517.557	417.050	221.042	253.252
1980	850.917	1.603.336	2.001.771	1.367.895	848.017	335.679	276.849	339.463	359.253	394.407		
1981	760.939	2.327.571	2.144.585	1.956.109	721.607	380.347	389.163	309.346	534.987	252.079	371.675	508.481
1982	1.344.353	1.945.060	1.539.472	1.937.477	1.862.385	687.206	525.106	347.946	1.160.408	2.379.404	2.553.877	
1983	2.591.048	2.199.827	2.552.711									
1984												
1985	1.455.647	1.363.818	1.395.734	1.114.225	1.235.921							
1986												
1987												
1988												
1989	722.255	549.779	424.489									
1990	490.030	291.713	236.753	336.078	222.576							
1991	416.675	241.545	148.979	192.137	253.033							
1994	0.000											
1995	705.202	499.897	281.108	436.637	418.877	260.805						
1996	774.338	1.381.835	1.316.590	1.140.580	578.404	359.062	257.472	226.203	214.055	150.920	177.702	
1997	739.078	1.152.368	1.346.642	1.590.976	1.304.814	1.231.410	913.610	1.181.107				
1998	1.362.044	1.268.084	1.429.037	1.262.096	934.397	539.437	409.953	301.154	332.071	220.458		
1999	748.702	1.316.623	1.498.751	1.361.361	1.305.626	633.363	487.929	288.917	370.175	476.345	340.905	748.763
2000	847.981	1.172.628	440.505	285.566	201.779	320.226						
2001	990.260	1.094.007	1.238.667	1.249.054	1.050.924	411.404	292.323	199.382	174.135	148.524	152.640	321.354
2002	558.447	1.499.725	2.025.731	1.603.700	1.125.498	832.907	378.282	218.296	241.863	496.822	389.648	
2003	1.414.529	1.142.781	1.593.547	1.303.698	642.994	376.958	256.142	201.441	273.824	223.653	515.474	
2004	841.055	1.120.802	1.109.119	1.149.472	1.361.149	611.241	305.756	207.187	263.947	280.007	283.770	386.495
2005	534.617	1.281.283	1.583.134	2.130.560	892.259	338.458	217.603	147.912	133.595	155.373	178.489	327.251
2006	630.937	2.242.655	2.150.396	1.777.359	682.570	313.805	270.775	397.457	268.211	595.441	796.338	
2007	1.179.256	1.616.756	1.907.817	2.181.365	1.884.587	1.261.952	569.841	363.105	254.826	261.120	315.338	391.414
2008	2.052.204	2.360.957	2.152.031	1.937.172	1.459.725	846.650	712.179	654.017	538.999	581.171	496.873	592.227
2009	1.609.751	1.998.187	2.126.785	1.343.996	1.095.453	509.830	361.368	260.852	226.904	164.055	139.172	753.556
2010	1.063.802	1.723.560	1.897.659	2.244.208	534.471	749.569	372.391	297.015	592.227			

**Gráfico 4.** Históricos de caudales. [6]

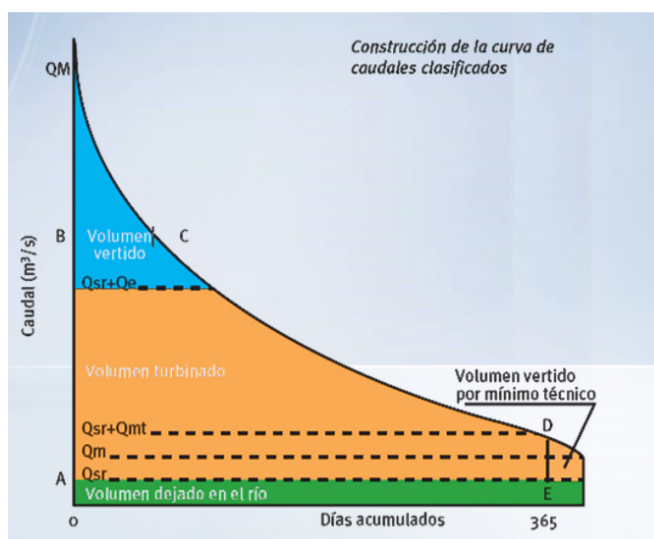
La medición de los caudales del río se realiza en las estaciones de mayor capacidad, donde se registran los caudales instantáneos que circulan por el tramo del río donde está ubicada la estación y a partir de estos se determinan los caudales máximos, medios y mínimos diarios y estos a su vez correspondientes a un gran número de años, con los que se elaboran series temporales agrupadas por años hidrológicos. [5] De todo este tipo de recolección de información al final, en todo estudio hidrológico, sea teórico o con datos reales de caudales, se obtendrá una serie anual lo suficientemente grande para realizar una distribución

estadística que nos tipifique los años en función de la aportación registrada: años muy secos, secos, medios, húmedos y muy húmedos.



**Gráfico 5.** Curva característica de caudales. [7]

Toda vez que se ha obtenido la distribución como se observa en la gráfica anterior, se tomará un año medio que sea representativo y se construirá la curva de caudales especificados de la cuenca que se haya estudiado lo que a su vez nos dará el caudal en la toma, en función de los días del año en que se supera dicho valor. Define muy adecuadamente para este propósito, en términos adimensionales, el sistema hidrológico de un cauce a efectos de su aprovechamiento hidroeléctrico. [7]



**Gráfico 6.** Curva de caudales clasificados. [7]

La curva de caudales clasificados proporciona una valiosa información gráfica sobre el volumen de agua existente, el volumen turbinado y el volumen vertido por servidumbre, mínimo técnico o caudal ecológico.

Para elaborar esta curva, hay que calcular los siguientes parámetros:

**$QM$ :** Caudal máximo alcanzado en el año o caudal de crecida.

**$Qm$ :** Caudal mínimo del año o estiaje.

**$Qsr$ :** Caudal de servidumbre que es necesario dejar en el río por su cauce normal. Incluye el caudal ecológico y el necesario para otros usos. El caudal ecológico lo fija el Organismo de cuenca, si no se conociera, una primera estimación es considerarlo igual al 10% del caudal medio interanual.

**$Qmt$ :** Caudal mínimo técnico. Es aquel directamente proporcional al caudal de equipamiento con un factor de proporcionalidad “K” que depende del tipo de turbina.

A continuación se muestra una primera aproximación de los valores de “K” según el tipo de turbina:

Tipo de turbina K	
Pelton	0,10
Kaplan	0,25
Semikaplan	0,40
Francis	0,40

**Tabla 2.** Tipos de turbinas

**$Qe$ :** Es el caudal de equipamiento y se elegirá de forma que el volumen turbinado sea máximo. A veces no se elige el caudal que proporciona mayor

producción, ya que hay que tener en cuenta otros factores como pueden ser: la inversión necesaria, instalaciones ya existentes que condicionan el caudal a derivar (por ejemplo, canales, túneles, etc.)

Según las recomendaciones habituales para el diseño de minicentrales y la experiencia acumulada, el caudal de equipamiento se suele seleccionar entre la horquilla aproximada del caudal superado entre 80 y 100 días al año. [5]

### 1.3.2 Potencia a instalar y producción

La mini central hidroeléctrica cuenta con una potencia disponible que varía en función del caudal de agua disponible para ser turbinado y el salto existente en cada instante. La expresión que nos proporciona la potencia instalada es la siguiente:

$$(P \text{ kW}) = \gamma \cdot Q_e \cdot H_n \cdot \eta_{total} \quad (1.1)$$

Según el tipo de equipo y el fabricante, el rendimiento de la maquinaria varía, pero a efectos de una primera aproximación, se puede tomar como factor de eficiencia para turbo generador moderno el valor de 0,80.

Una vez conocida la potencia es posible calcular la producción media de la mini central hidroeléctrica, como producto de la potencia en cada momento por las horas de funcionamiento. Para la simulación del cálculo de la producción se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones:

Como el caudal es variable en función del tiempo, la energía se calculará en períodos de tiempo en los que el caudal pueda considerarse constante. Respecto al salto, se podrá considerar constante en centrales fluyentes y será variable en centrales de pie de presa (curva Q-H del embalse)

## CAPITULO II

### 2 TRANSFORMADA WAVELET (WT)

En el trabajo de análisis usual, al capturar y trazar una señal sólo se obtiene un gráfico de amplitud en función del tiempo. A veces, es necesaria la información de frecuencia y fase, donde se plantea la pregunta de cómo saber lo que sucede con las características de una forma de onda determinada. El procesamiento de señales podría ayudar, pero hay que saber qué tipo de tratamiento hay que aplicar para resolver el problema de análisis de datos.

La transformada de Wavelet (WT) como una herramienta matemática tiene relativamente poco de ser trabajada, a pesar de que las ideas en las que se basa ya tiene un buen tiempo siendo analizadas hasta llegar a aplicarla tal como se conoce. La primera mención registrada de lo que hoy se conoce como “wavelet” fue vista en 1909 en una tesis realizada por A. Haar.

El concepto de ondas (wavelet) en su forma teórica actual fue propuesto por primera vez por el geofísico J. Morlet, y por el equipo del Centro de Física Teórica de Marsella de Francia, trabajando bajo la tutela del físico teórico A. Grossmann. Ellos proponían una forma de pensamiento intuitivo desde la concepción física para el análisis de las “ondas” (wavelet). También demostraron que con casi cualquier forma de onda podían recuperar la señal exactamente a partir de su transformada de acuerdo a Graps, . En otras palabras, querían decir que la transformación de una señal no cambia el contenido de la información presentada por dicha señal.

Para resumir, la WT trata de una transformación lineal, al igual que la transformada de Fourier (FT); no obstante, a diferencia de la FT proporciona la localización en el dominio del tiempo de las diferentes componentes en frecuencia presentes en la señal que se analiza. La transformada de Fourier de ventana o por ventana (STFT) consigue parcialmente este objetivo, identificar la frecuencia – tiempo, pero el análisis en el ancho fijo de la ventana supone una limitante.

En el caso de la WT, las funciones de análisis llamadas wavelet realizan la correlación

tiempo – frecuencia de tal forma que las wavelets de alta frecuencia serán más estrechas y las de baja frecuencia serán más anchas.

La teoría de wavelet se puede presentar principalmente de 2 maneras: la consideración de la forma integral de la transformada (forma continua) y la consideración del análisis multiresolución a base de filtros (forma discreta).

Algo adicional que mencionar sobre las wavelets, es que las ondas son del tipo irregular por lo tanto el análisis requiere que ondas con cambios bruscos son más fáciles de tratar con esta herramienta matemática. [6]

## 2.1 Transformada Wavelet Continua (CWT).

Entonces en la consideración de la transformada Wavelet Continua (CWT) se realiza el análisis en un segmento localizado la misma y consiste en expresar una señal continua como una expansión términos o coeficientes del producto interno entre la señal y una función Wavelet “Madre”  $\Psi(t)$  [7]. Donde una función Wavelet Madre es una función localizada, perteneciente al espacio,  $L^2 R$ , que contiene todas las funciones con energía finita y funciones de cuadrado integrable definidas.

$$f \in L^2 \Rightarrow \int |f(t)|^2 dt = E < \infty \quad (2.1)$$

De esta manera se cuenta con una única ventana modulado y a partir de esta se genera una completa familia de funciones elementales mediante dilataciones o contracciones y traslaciones en el tiempo  $\Psi_{u,s}(t)$ , denominados átomos Wavelet o Wavelet hijas que cumplen con todas las condiciones de la forma:

$$\psi_{u,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-u}{s}\right) \quad (2.2)$$

La Wavelet Madre debe cumplir con la condición de admisibilidad,

$$C_\psi = \int_0^\infty \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (2.3)$$



Lo que quiere decir que la función  $\psi(t)$  este bien localizada en el tiempo; es decir, que la función oscile alrededor de un eje y su promedio sea cero, matemáticamente  $\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt=0$ , y que la transformada de Fourier  $\psi(\omega)$  sea un filtro continuo pasa-banda, con rápido decrecimiento hacia el infinito y hacia  $\omega = 0$ .

La transformada Wavelet de una función  $f(t)$  a una escala  $s$  y una posición  $u$ , es calculada por la correlación de  $f(t)$  con una  $\psi_{u,s}(t)$  de la forma

$$CWTf(u, s) = \langle f, \psi_{u,s} \rangle \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{u,s}(t) dt < \infty \quad (2.4)$$

$$CWTf(u, s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-u}{s}\right) dt \quad (2.5)$$

Para escalas pequeñas ( $s < 1$ ), con la CWT se obtiene información localizada en el dominio del tiempo de  $f(t)$  y para escalas ( $s > 1$ ), la información de  $\hat{f}(\omega)$  se presenta localizada en el dominio de la frecuencia.

La transformada wavelet maneja un plano de tiempo-escala, pero también puede ser de tiempo-frecuencia, para esto se recurre al Teorema de Parseval y de esta manera es posible definir la transformada Wavelet en el dominio de la frecuencia.

$$CWTf(u, s) = \int_{-\infty}^{\infty} \hat{f}(\omega) \sqrt{s\psi^*}(s\omega) e^{j\omega u} d\omega \quad (2.6)$$

Para poder introducir el término de escala y frecuencia, es necesario ante todo definir una constante ( $c$ ), que permite realizar un cambio de variable de una escala  $s$  a una frecuencia  $\omega$ :

$$s \rightarrow \omega = \frac{c}{s} \quad (2.7)$$

Con este cambio de variable es posible observar que la CWT localiza de forma *simultánea* la señal  $f(t)$  en el dominio del tiempo como su espectro  $\hat{f}(\omega)$  en el dominio de la frecuencia.

De igual manera, es posible realizar una Transformada Wavelet inversa, que permita reconstruir la señal, a partir de la CWT (que preserva la energía de la señal) y las  $\psi_{u,s}(t)$

$$f(t) = C_\psi \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty CWT f(u, s) \psi_{u,s}(t) \frac{du ds}{s^2} \quad (2.8)$$

## 2.2 Transformada Wavelet Discreta (DWT)

Por la complejidad en el tratamiento numérico de la DWT, debido a la variabilidad en forma continua de los parámetros de escala como de traslación, es indispensable contar con una herramienta que permita la discretización de esta. Es así que se pasará de un mapeo continuo a un espectro o conjunto finito de valores, a través del cambio de la integral por una aproximación con sumatorias. La discretización permite representar una señal en términos de funciones elementales acompañadas de coeficientes

$$f(t) = \sum_\lambda c_\lambda \varphi_\lambda \quad (2.9)$$

En los sistemas Wavelet las Wavelet madre  $\psi(t)$  traen consigo unas funciones de escala  $\phi(t)$ , las primeras son las encargadas de representar los detalles finos de la función, mientras las funciones de escala realizan una aproximación. Es posible entonces representar una señal  $f(t)$  como una sumatoria de funciones wavelet y funciones de escala:

$$f(t) = \sum_k \sum_j c_{j,k} \phi(t) + \sum_k \sum_j d_{j,k} \psi(t) \quad (2.10)$$

## 2.3 Aplicaciones de la Transformada Wavelet (WT) en el análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia.

La transformada de wavelet ha originado gran interés en varios campos como en el área biomédica, en las comunicaciones, acústica, mecánica, ciencia de la

computación, fallas en la distribución eléctrica; por último, encontramos también varias aplicaciones en los sistemas eléctricos de potencia.

Las wavelet se aplicaron por primera vez a los sistemas de potencia eléctrica en 1994 por Robertson [8] y Ribeiro [9]. A partir de este año el número de publicaciones en esta área han aumentado, la tendencia ha sido creciente.

La mayor parte de los trabajos publicados se centran en el análisis de métodos de identificación y clasificación de las señales; no obstante, hasta ahora pocos estudios emplean la transformada de wavelet como técnica de análisis de fenómenos transitorios para la solución de voltajes e intensidades que se propagan a lo largo del sistema.

Las aplicaciones más selectas de WT en sistemas eléctricos de potencia donde se han centrado en las siguientes áreas de estudio:

- Calidad de energía.
- Descargas parciales.
- Estimación de la demanda.
- Medida de potencia.
- Protección de sistemas eléctricos de potencia.
- Transitorios en sistemas eléctricos de potencia.

### 2.3.1 Calidad de energía.

En el área de calidad de energía, varios estudios se han realizado para detectar y localizar las perturbaciones utilizando la WT, como una herramienta útil para análisis de interferencias, impulsos, interrupciones, armónicos, parpadeo (flicker), etc. de señales no estacionarias causantes del deterioro del servicio. Estas perturbaciones son perturbaciones "de cambio lento". Por lo tanto, contiene sólo los contenidos espectrales en la gama de frecuencias bajas. Por lo tanto, examinando los coeficientes de la WT (WTCS) en niveles muy altos de descomposición ayudarían a determinar la ocurrencia de los eventos de perturbación, así como el tiempo en el que sucede. Contando con esto, las técnicas DWT han sido ampliamente utilizadas para analizar los eventos de

perturbación en sistemas de potencia.

El análisis de los armónicos y del parpadeo “flicker” se ha efectuado de acuerdo a dos líneas de estudio: la primera utiliza el análisis multiresolución (MRA) a partir de un banco de filtros como primera etapa para luego emplear la Transformada de Wavelet Continua a las sub-bandas; la segunda emplea un análisis de una WT compleja.

Partiendo de la primera línea de trabajo, en 1999 se muestra un estudio [10] para evaluar armónicos desarrollando un algoritmo para la identificación de todos ellos, incluyendo enteros, no enteros y subarmónicos. En la primera etapa de este análisis, el espectro de frecuencias de la señal se descompone en dos sub-bandas empleando la técnica de filtrado de la transformada de wavelet packet discreta con funciones Daubechies de alto nivel, para posteriormente aplicar la transformada continua a las sub-bandas no nulas, alcanzándose resultados satisfactorios a partir de un sistema de prueba real. En trabajos posteriores [11] - [12], se presenta una mejora para eliminar el efecto de la respuesta en frecuencia imperfecta de los filtros empleados y para un análisis de sub-armónicos. [13]- [14] son los otros estudios que muestran el análisis de armónicos y “flicker” de forma similar a los comentados anteriormente. También existen trabajos en la misma línea que emplean la transformada madre diferente [15].

Con respecto al segundo caso o línea de investigación, [16] realiza un análisis de armónicos con una función wavelet trapezoidal compleja y la transformada trapezoidal asociada. [17]- [18] muestran un estudio del parpadeo “flicker” empleando la transformada de wavelet continua Morlet y gaussiana.

Algo interesante de comentar es que a pesar de que queda demostrado en los trabajos anteriores la ventaja del uso de esta técnica; no obstante, la efectividad de esta técnica para las perturbaciones de voltaje es cuestionado [19], señalando que STFT es más apropiada para este tipo de análisis eligiendo apropiadamente el ancho de la ventana.

Sobre las perturbaciones en los sistemas eléctricos de potencia, los trabajos que

incursionaron en la transformada de Wavelet lo hicieron buscando perturbaciones que afecten a la calidad de energía eléctrica, descomponiendo los coeficientes wavelet y efectuando análisis multiresolución. Santos comienza una línea de investigación en este campo [20], luego el mismo autor recopila otra serie de trabajos en [21], [22]- [23], donde propone una herramienta de clasificación para las perturbaciones que afectan la calidad de energía eléctrica basada en redes neuronales, y estos a su vez en base a la unicidad de los coeficientes cuadrados de la transformada de wavelet para cada escala, pero además el mismo autor en [24] describe el desarrollo de una aplicación para comprimir las señales que alteran la calidad de la energía eléctrica.

A pesar de esto, hay otros trabajos de otros autores que concluyen que el uso de la transformada de wavelet en estudios y análisis para algunas perturbaciones no será lo más adecuado, tal es el caso del análisis de hueco de tensión o hueco “sag” donde los autores de un artículo [25] aseguran que los filtros wavelet no pueden detectar la profundidad del hueco, lo que dificulta el análisis completo para una perturbación de estas características.

### 2.3.2 Descargas parciales.

Este tipo de señales por su corta duración son difíciles de detectar, alta frecuencia y baja amplitud, no obstante, la transformada de Wavelet frente a la transformada de Fourier permite ampliar en el tiempo las discontinuidades, por lo que es fácil distinguir variaciones locales de una señal. Algunos trabajos [26]- [27] aplican estos principios para detectar descargas parciales en la línea de transmisión eléctrica entre los devanados de los transformadores, cables y subestaciones aisladas con gas SF<sub>6</sub> (GIS) como en el caso de la central de Itaipu.

### 2.3.3 Estimación de la demanda.

Para la eficiente gestión de los sistemas eléctricos de potencia se debe tener muy en cuenta la estimación de la demanda. Los trabajos realizados en esta área se han centrado en la predicción de la carga en corto plazo utilizando la transformada de wavelet en combinación con redes neuronales. Cada

componente de la demanda en cualquier instante se puede asumir como una combinación lineal de diferentes componentes, desde el punto de vista del análisis de la señal, la carga puede ser considerada también, como una combinación lineal de diferentes frecuencias.

Los estudios realizados sobre el tema usan las transformadas wavelet para descomponer la carga histórica en una parte aproximada, asociada con las bajas frecuencias y diferentes detalles asociados a con las altas frecuencias. Posteriormente, la predicción de la carga futura se desarrolla, o bien, mediante una aproximación neuronal, tal como muestran [28]- [29] o ajustando la carga mediante métodos de regresión [30].

#### 2.3.4 Medidas de potencia.

Una de las ventajas de utilizar la transformada de Wavelet para la medida de potencia es que proveen una distribución de la potencia y energía con respecto a las bandas individuales de frecuencias asociadas a cada nivel del análisis Wavelet.

No existen muchos trabajos relacionadas con las mediciones de potencia y valores eficaces utilizados por Wavelets; sin embargo, se ha utilizado la transformada directa de Wavelet para obtener valores eficaces en voltajes e intensidades. La medición de potencia activa es analizada en algunos trabajos [31]- [32], para conseguir la separación en varias frecuencias de diferentes niveles utilizando filtros (respuesta infinita al impulso) IIR; no obstante, esta técnica proporciona una bandas de frecuencia no uniformes que no pueden ser empleadas para la medida del valor eficaz de tensiones e intensidades y la potencia de las componentes individuales de los armónicos. En otro trabajo presentado [33] se resuelve el inconveniente anterior desarrollando el algoritmo wavelet packet para descomponer la señal en bandas de frecuencias uniformes, de tal forma que mediante esta técnica ahora si pueda medir el valor eficaz de voltajes e intensidades y con esto la potencia de las componentes individuales de los armónicos.

#### 2.3.5 Protección de los sistemas eléctricos de potencia.

En los últimos años han sido destacados los trabajos [34] [35] relacionados con la mejora en el funcionamiento de los relés de protección. En 1996 [36] Chaari introduce la técnica de wavelet para analizar las ondas transitorias producidas por las fallas a tierra en una red resonante con neutro a tierra de 20 kV generada a partir del programa EMTP (ElectroMagnetic Transient Program) ó ATP (Alternative Transient Program).

Hay dos criterios principales para la selección de la wavelet madre en el relé de protección del sistema de potencia. El primero, la forma y la expresión matemática de la wavelet se deben configurar de tal manera que la interpretación física de coeficientes wavelet sea fácil. El segundo, la wavelet elegida debe permitir un cálculo rápido de coeficientes wavelet. En el mismo año Momoh James A. presenta un trabajo donde desarrolla un algoritmo que realiza el entrenamiento de una red neuronal artificial para el diagnóstico de fallas, en esta oportunidad los datos obtenidos son experimentales.

En 1998 [37] se desarrolla una nueva línea de investigación en lo concerniente a búsqueda de fallas utilizando wavelets, donde una onda viajera asociada a la falla generada se procesa en wavelet para saber los tiempos entre la falla y la detección por parte de los relés del sistema de protección. Para comprobar el método y validar la prueba realizan pruebas en el EMTP. En 1999 los mismo autores extienden el mismo método a la identificación de fallas laterales, en sistemas radiales de distribución [38] , posteriormente en 2000 ofrecen un trabajo mejorado para sus anteriores trabajos [39].

Existen algunos trabajos similares con respecto a la localización de fallas [40]- [41].

Otra línea es la detección de fallas de alta impedancia [42]- [43]- [44] es otra área de aplicación de la transformada wavelet, tal es el caso que Charytoniuk presenta en [44] un análisis comparativo para la localización de fallas con arco en el dominio del tiempo, frecuencia y tiempo-frecuencia (wavelet), el autor que la alternativa wavelet es fuertemente dependiente de la familia wavelet escogida, nivel de descomposición, velocidad de muestreo y del comportamiento de la

falla de arco.

El empleo de las wavelets al estudio del disparo monopolar de protecciones [45] [46] Se desarrolla para acelerar la apertura de las líneas de transmisión. La transformada de Wavelet se usan en este caso para analizar los transitorios asociados a la falla generado por un segundo arco y las fallas permanentes, los resultados cuantitativos dejan ver que ciertos componentes de la wavelet pueden ser usados para identificar o detectar de manera eficiente las características relevantes de la falla en los sistemas eléctricos de transmisión, así como en la diferencia entre fallas transitorias y permanentes.

Se ha extendido el estudio de WT a la protección de barras [34], de motores [47]- [48] con respecto a generadores [49]- [50] así también en transformadores [51]- [52], en la mayoría de estos casos analizados, el espectro de las señales se analiza con la transformada de wavelet (WT) para desarrollar un algoritmo en línea para detectar la degradación que sufre el aislante, corriente inrush y la discriminación precisa entre fallas interna y externas.

#### 2.3.6 Transitorios en sistemas eléctricos de potencia

Uno de los primeros trabajos donde se utilizaron wavelets fueron aplicados a los transitorios de sistemas eléctricos de potencia en 1994 [8]. En este trabajo los autores presentan una metodología para desarrollar un software que especifique las perturbaciones en los sistemas de potencia todo esto a partir de la forma de onda de la señal transitoria. Y esta a su vez se obtiene a partir de la transformada wavelet aplicada a la señal transitoria.

Robertson en 1996 [53] realiza un análisis sobre los transitorios derivados de las conexión de bancos de condensadores para lo cual utiliza Wavelets y donde realizan la implementación digital de la transformada a partir de un conjunto de filtros donde se manifiesta que cualquier tipo de wavelet es aplicable en la implementación.

Hasta ahora los estudios se han centrado en métodos de identificación de



transitorios; es decir, identificar una perturbación transitoria y en algunas situaciones clasificarlas de acuerdo a su espectro wavelet. Heydt y Galli [54]-[55] exponen el uso de wavelet Morlen como técnica de análisis de los transitorios en los sistemas eléctricos de potencia como herramienta de solución analítica, que en este caso el termino análisis más bien quiere decir, encontrar las corrientes y voltajes en una perturbación transitoria propagada en el sistema.

Meliopoulos [56] en el 2000 expone en su trabajo un método alternativo para el análisis de los transitorios en los sistemas eléctricos de potencia. Esto es posible si se basa en las series wavelet de expansión y reconstrucción. La matriz del sistema se desarrolla a partir del uso de las wavelets de expansión de las ecuaciones integro-diferenciales del sistema de potencia. Este procedimiento da un conjunto de ecuaciones algebraicas para la red completa. La solución se muestra en función de los coeficientes wavelets de expansión para el voltaje en los nudos de la red.

Estos voltajes también pueden ser reconstruidos a partir de las series de wavelets de reconstrucción.

A más de la aplicación de las wavelets para el desarrollo de métodos de identificación, clasificación y análisis como los presentados en todos estos casos, se conoce que en la actualidad se está estudiando la aplicación de las wavelets para el desarrollo de nuevos modelos para componentes. Abur [57] en el 2001 extienden los resultados de los trabajos previos [58] donde describe un modelo para línea de transmisión basado en la transformada de Wavelet teniendo en cuenta la dependencia con la frecuencia de las matrices de transformación modales en la simulación de transitorios.

Para simulación de la dependencia de la frecuencia de los transitorios en las líneas de transmisión no transpuestas se presenta un enfoque diferente. El efecto de la dependencia fuerte con la frecuencia de las matrices modales de transformación en los transitorios de las líneas de transmisión se tiene en cuenta para simulación en el dominio del tiempo mediante el uso de la transformada Wavelet aplicada a las señales. Esto permite el uso de las matrices modales de

transformación exactas que varían con la frecuencia y que se mantienen en el dominio del tiempo en las simulaciones.

## CAPITULO III

### 3 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS MEDIANTE WAVELETS

#### 3.1 Principios y algoritmos para determinación de la óptima wavelet madre.

##### 3.1.1 Transformada Wavelet

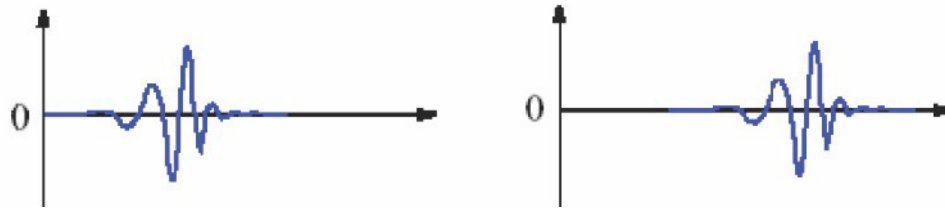
“La transformada Wavelet genera bloques de información en escala y tiempo de una señal.”

Los bloques son generados a partir de una función llamada wavelet madre o wavelet básica  $\Psi(t)$ , a través de las variables  $\tau$  y  $s$ , parámetros de traslación y escala respectivamente.

$$\Psi_{\tau,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \Psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) ; \tau, s \in R, s \neq 0 \quad (3.1)$$

##### Traslación

El parámetro traslación se refiere a la orientación de la ventana a medida que la función matemática (wavelet madre) se mueve a través de la señal. Esta variable corresponde al tiempo en la transformada wavelet.



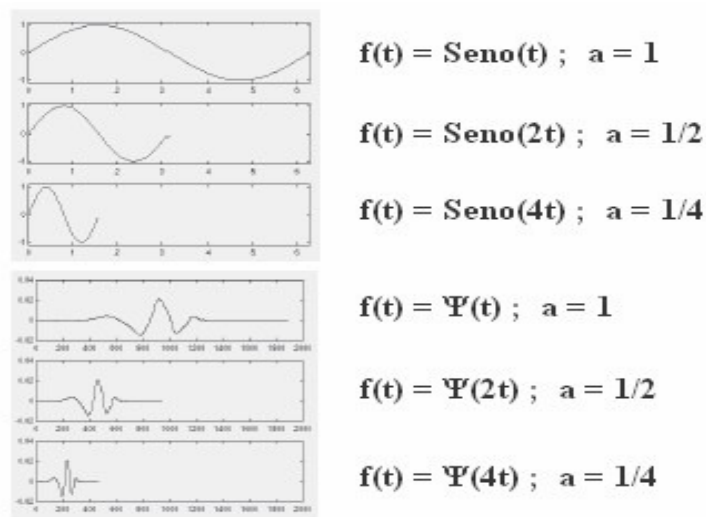
**Gráfico 7.** Traslación de una wavelet madre. [61]

##### Escala

El término escala, se define de la misma manera a aquella que se utiliza en mapas. En otras palabras, una escala pequeña se emplea para obtener una visión detallada, en cambio una escala grande se aplica con el fin de realizar una visión global.

Por lo tanto, para el análisis de baja frecuencia, se requerirá una escala mayor y viceversa.

$$Escala = \frac{1}{frecuencia}$$



**Gráfico 8.** Función Seno a diferentes escalas. [61]

En resumen se puede decir que:

- Escala pequeña  $\Rightarrow$  wavelet comprimida  $\Rightarrow$  capta los detalles que cambian rápidamente  $\Rightarrow$  altas frecuencias.
- Escalado grande  $\Rightarrow$  wavelet expandida  $\Rightarrow$  capta los detalles que cambian lentamente  $\Rightarrow$  bajas frecuencias.



**Gráfico 9.** Diferencia de escala grande y escala pequeña en una señal

La palabra análisis, se le conoce como el proceso de transformada de una señal, mientras que síntesis se define como el procedimiento de reconstruir la señal a partir de la transformada Wavelet.

La transformada Wavelet al igual que la transformada de Fourier, manejan el método de superposición para realizar una aproximación de las señales no sinusoidales, con la única diferencia que la transformada de Fourier descompone la señal mediante ondas sinusoidales de diferentes frecuencias, mientras que el análisis Wavelet trocea la señal en versiones escaladas y desplazadas de una wavelet llamada wavelet madre.

### 3.1.2 Familia de funciones

La transformada Wavelet depende de una función básica denominada Wavelet madre para descomponer la señal. Las funciones wavelets se distribuyen en familias y cada una de ellas tienen diferentes características como:

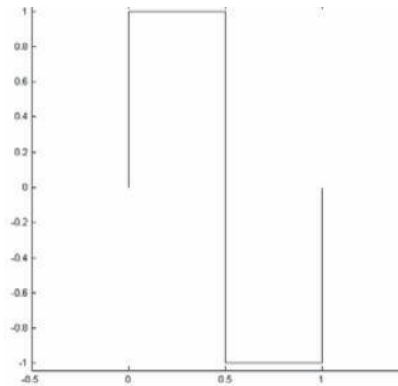
- Momentos de desvanecimiento: Es un parámetro que nos ayuda a determinar la forma de la wavelet y la habilidad de ésta para suprimir un polinomio dado.
- Orden: Variable dada por el número de desvanecimientos.
- Soporte Compacto: “Es la propiedad de que la wavelet sea de duración finita, lo que permite una menor complejidad en los cálculos, mejor resolución en tiempo y pobre resolución en frecuencia.”
- Simetría: Establece que los filtros sean de fase lineal.
- Ortogonalidad: Es una de las características más importante porque permite que los análisis sean estables. Matemáticamente es una propiedad que se obtiene cuando el producto punto de dos vectores es igual a cero.

Las familias de funciones existentes en la actualidad son numerosas, pero las más usadas son:

### 3.1.3 Haar

Es una de las primeras wavelets en aparecer y la más empleada para el análisis de señales usando transformadas continuas y discretas debido a su forma de onda sencilla (Función escalón). Posee un solo momento de desvanecimiento y la función que cumple la wavelet es:

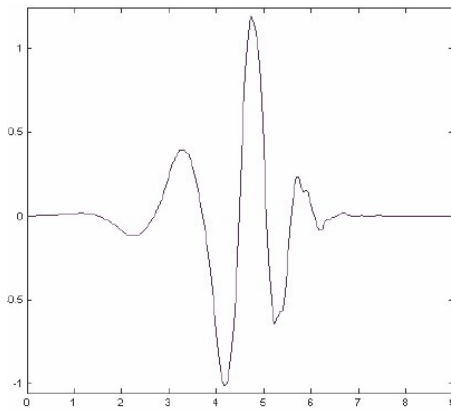
$$\Psi(t) = \begin{cases} 1; 0 \leq t \leq \frac{1}{2} \\ -1; \frac{1}{2} < t < 1 \\ 0; \text{otro caso} \end{cases}$$



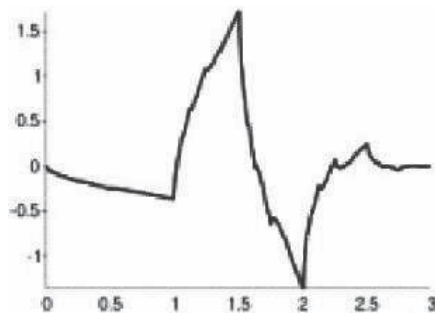
**Gráfico 10.** Familia Haar. [61]

### 3.1.4 Daubechies

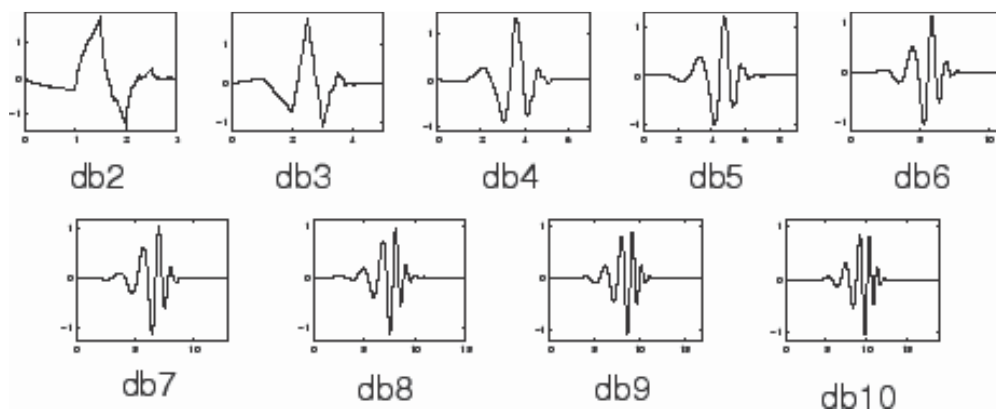
Llamado como dbN, donde N es el orden que depende del número de momentos de desvanecimiento deseado. Esta wavelet tiene la propiedad de la Ortogonalidad y se puede utilizar al igual que en el caso anterior para transformadas discretas y continuas. La wavelet Daubechies de orden 1 es igual a la wavelet Haar.



**Gráfico 11.** Familia Daubechies de orden 5 (db5). [61]



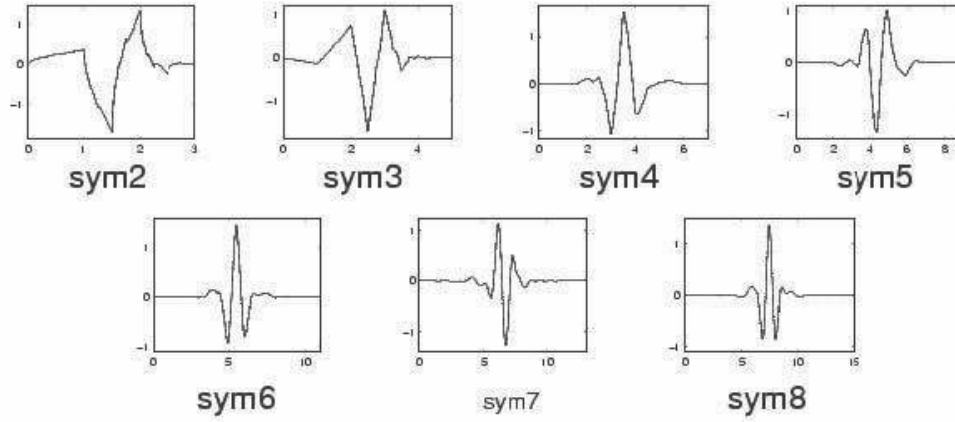
**Gráfico 12.** Wavelet Daubechies de orden 2 (db2). [61]



**Gráfico 13.** Familia Daubechies de orden 2 al 10. [61]

### 3.1.5 Symmlets

Aparecen con el objetivo de adicionar algo de simetría a la función Daubechies, se denota como symN, donde N es el orden que va desde 2 hasta 45 y cumple con la propiedad de Ortogonalidad.



**Gráfico 14.** Wavelet Symmlet de orden 2 al 8 [61]

### 3.1.6 Sombrero Mexicano

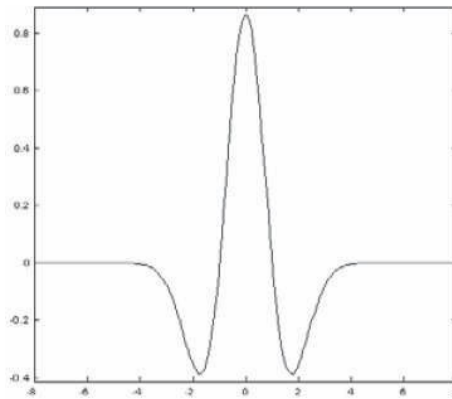
La wavelet sombrero mexicano se define como la segunda derivada de la función de probabilidad Gaussiana (distribución normal).

Esta wavelet madre es simétrica al igual que la wavelet Haar, permitiendo así, el análisis de señales de un modo simétrico.

La función que define esta familia es:

$$\Psi(t) = mexh(t) = \frac{2(1-t^2)e^{-\frac{t^2}{2}}}{\frac{1}{\pi^{\frac{1}{4}}\sqrt{3}}} \quad (3.2)$$

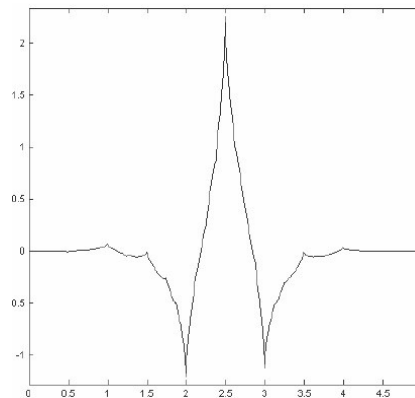




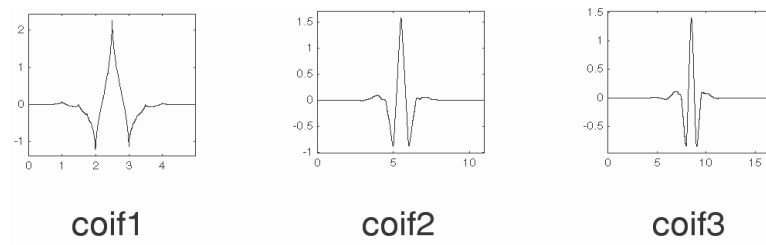
**Gráfico 15.** Wavelet Sombrero Mexicano. [61]

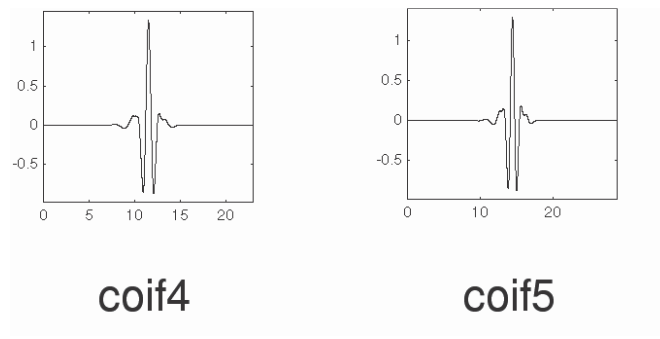
### 3.1.7 Coiflets

Denominado como  $\text{coifN}$ , esta wavelet puede ser simétrica o asimétrica dependiendo del orden  $N$  (1-5); tiene mayor número de momentos de desvanecimiento, porque para cada orden se tiene  $2N$  de momentos de desvanecimiento.



**Gráfico 16.** Familia Coiflet de orden 1 (coif1). [61]





**Gráfico 17.** Wavelet Coiflet de orden 1 al 5. [61]

### 3.1.8 Biortogonales

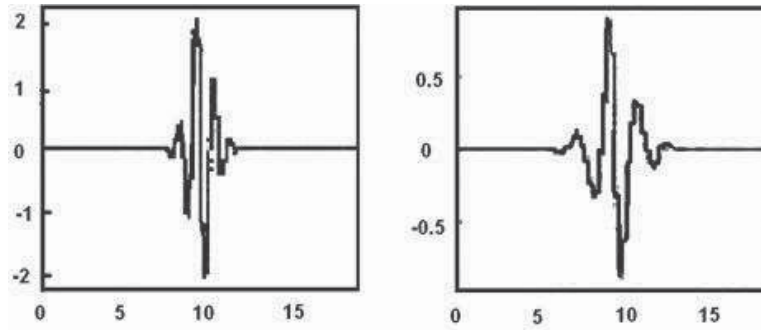
“Se caracterizan por su fase lineal, lo cual es requisito fundamental de cara a la reconstrucción. A diferencia de las demás familias, provee una función para descomposición y otra para reconstrucción.”<sup>49</sup>

No cumple la propiedad de Ortogonalidad y la orden para la reconstrucción y descomposición se denota con Nr. y Nd respectivamente.

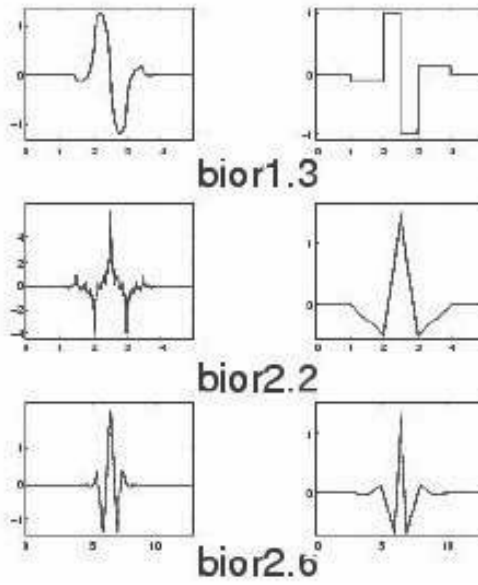
Todas las órdenes de las biortogonales son:

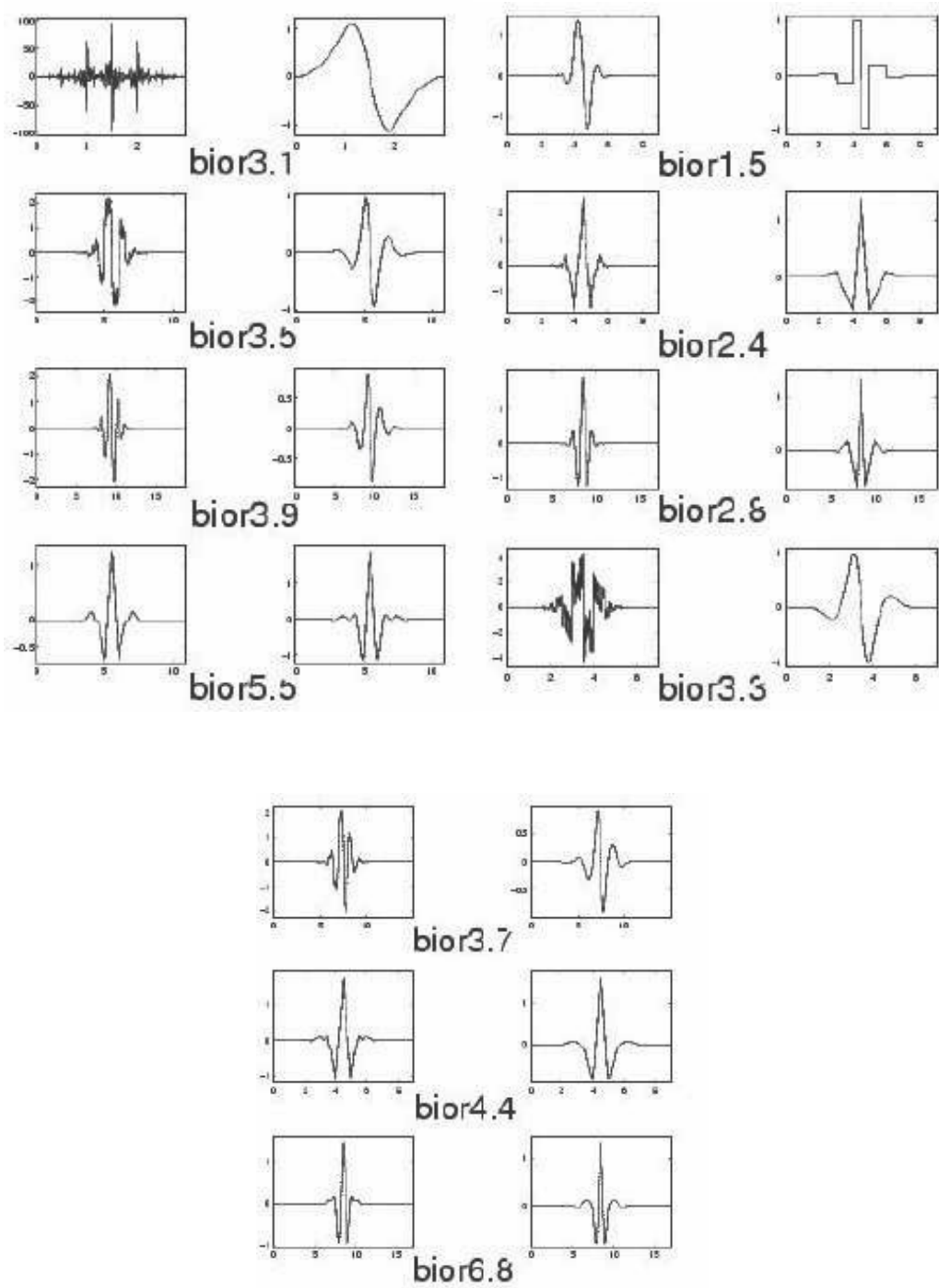
Nr.	Nd
1	1, 3, 5
2	2, 4, 6, 8
3	1, 3, 5, 7, 9
4	4
5	5
6	8

**Tabla 3.** Ordenes biortogonales



**Gráfico 18.** Familia Biortogonal de orden 3.9 (Nr. Nd). [61]





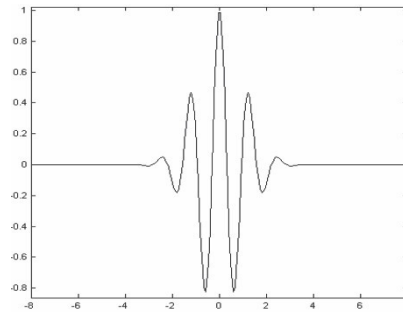
**Gráfico 19.** Familias Biortogonales utilizados en MATLAB. [61]

### 3.1.9 Morlet

Carece de la propiedad de Ortogonalidad, y se emplea solamente para realizar la transformada wavelet continua.

La función que define esta wavelet es:

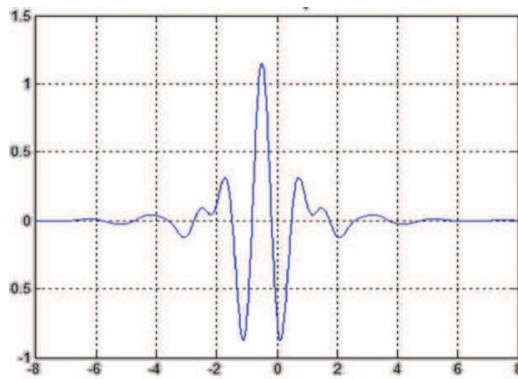
$$\psi(t) = \text{morl}(t) = e^{-\frac{t^2}{2}} \cos(5t) \quad (3.3)$$



**Gráfico 20.** Wavelet Morlet. [61]

### 3.1.10 Meyer

Creada por Ives Meyer en el año 1985, con características de ortogonalidad y simetría.



**Gráfico 21.** Función Meyer. [61]

No existe un criterio definido para determinar la familia idónea para un caso específico, sin embargo su elección dependerá de su aplicación que se le vaya a

dar; por lo tanto, la buena elección definirá si se obtienen resultados correctos o no.

### 3.2 Transformada Wavelet Continua versus Discreta.

#### 3.2.1 Clasificación de la transformada de Wavelet

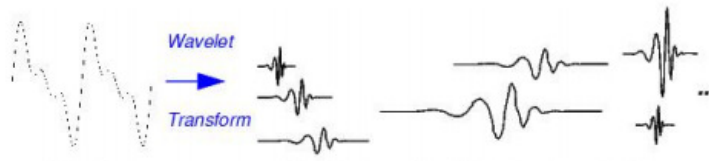
Dentro de la clasificación típica tenemos tres tipos: Continua, Semi-discreta, Discreta. La principal diferencia entre transformadas, es la forma en que se, muestran los parámetros de escala y traslación (continuas y discretas).

#### 3.2.2 Transformada Wavelet Continua (CWT).

“La expresión matemática de la Transformada Wavelet Continua (CWT) se define como la suma para todo instante de tiempo de la señal  $f(t)$  multiplicada por versiones escaladas y desplazadas de una función wavelet base. “ [59]

$$Coef(escala, posición) = \frac{1}{\sqrt{escala}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \psi(escala, posición) dt \quad (3.4)$$

La idea fundamental como se puede observar para la descomposición de una señal es similar a una transformada de Fourier, dado que en uno de los métodos se lo realiza mediante la suma de ondas sinusoidales de diferentes frecuencias, y este método se lo realiza mediante una suma de ondas sinusoidales de diferentes frecuencias, y este método se lo realiza a través de diferentes valores de escala y traslación en base a la transformada de wavelet madre que se seleccione.



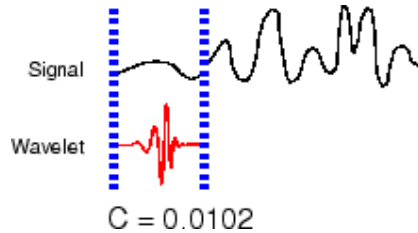
**Gráfico 22.** Consecución grafica de la CWT. [61]

#### 3.2.3 Pasos para determinar la transformada de wavelet continua.

1. Escoger la wavelet madre que tenga la propiedad de realizar esta transformada, y la que mejor se ajuste a la señal a ser analizada, para de esta

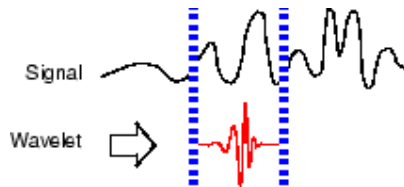
manera observar resultados óptimos.

2. Seleccionar el valor de la escala ( $s$ ) a la wavelet madre, y situarla al comienzo de la señal ( $t=0$ ).



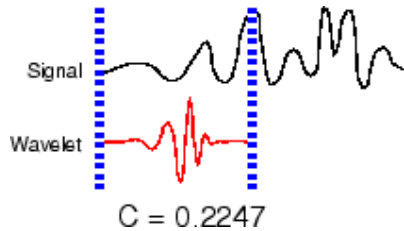
**Gráfico 23.** Descomposición de la señal. [61]

3. Multiplicar la señal  $f(t)$  y la wavelet madre en la escala escogida y  $t=0$ , y ese resultado se le integra a través de todo el espacio de tiempo de wavelet que cubre la wavelet y finalmente multiplicar por  $\frac{1}{\sqrt{s}}$ , “con el objeto de normalizar la energía y de este modo obtener una función transformada con la misma energía a cualquier escala.” [60]



**Gráfico 24.** Descomposición de la señal. [61]

4. Para el mismo valor de la escala  $s$ , se desplaza la wavelet hacia el sentido positivo del eje de tiempo en  $\tau$  tiempo, repetir el numeral 3. Este procedimiento se lo realiza hasta que la wavelet cubra toda la señal.

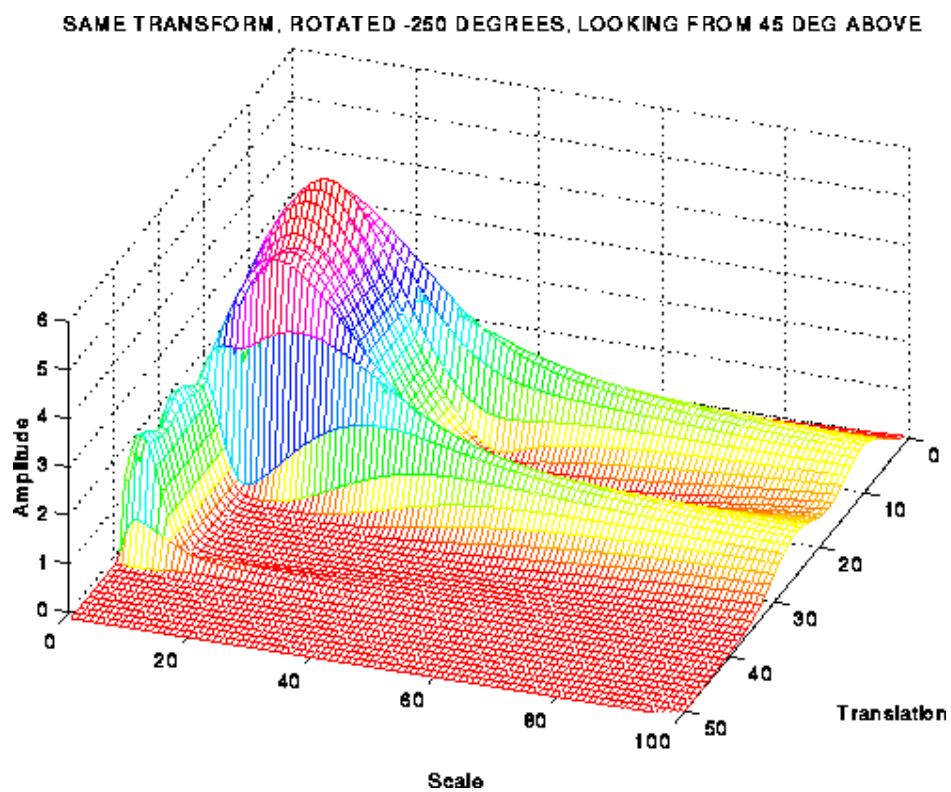


**Gráfico 25.** Descomposición de la señal. [61]

5. Cambiar el valor de la escala y luego repetir los numerales 2 al 4.

Hay que puntualizar que a menor escala, mayor número de traslaciones se tendrá y se aumentará el número de operaciones.

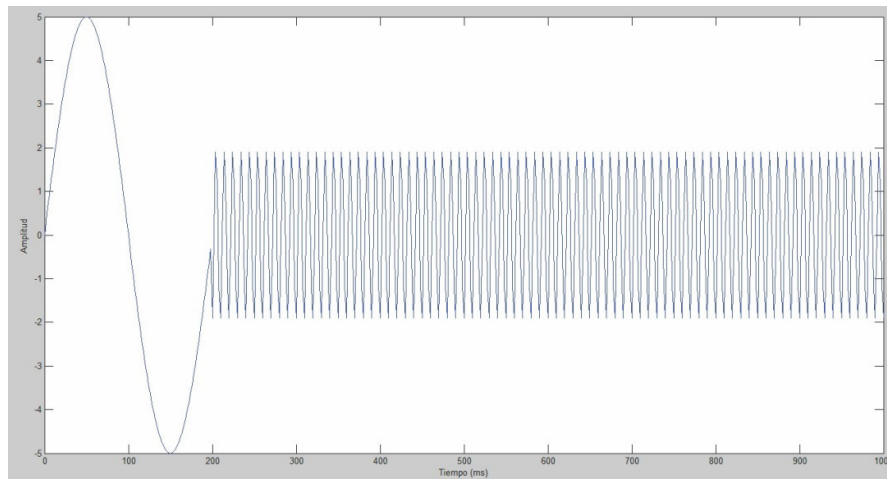
Los valores y de escala y tiempo se puede representar en un modelo tridimensional.



**Gráfico 26.** Representación tridimensional. [64]

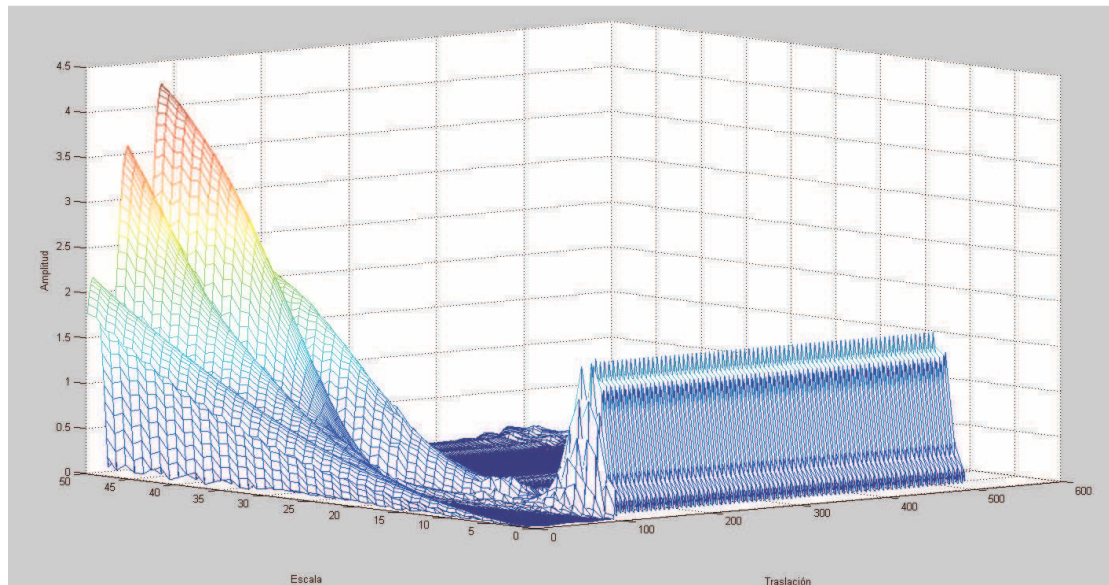


Realizar el análisis espectral de la siguiente señal:

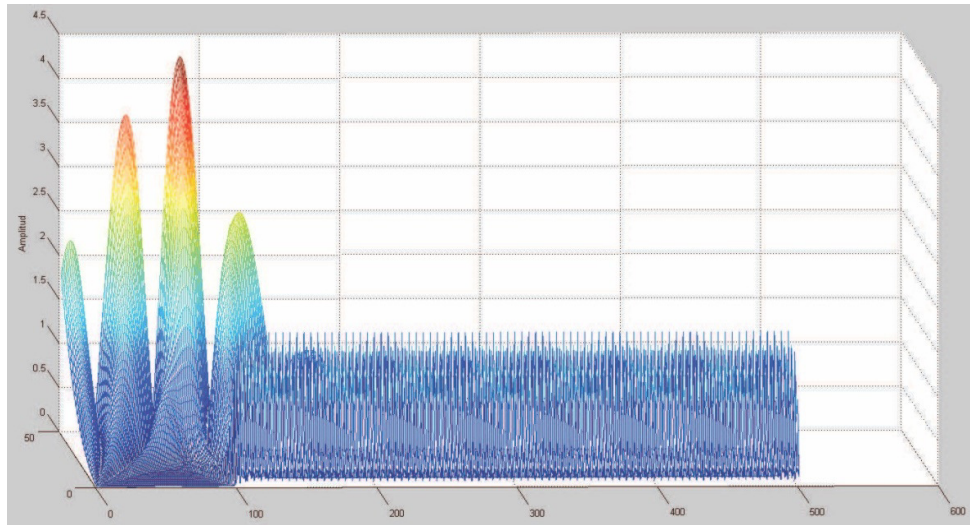


**Gráfico 27.** Señal no estacionaria de frecuencias 5 y 100 Hz. [65]

Aplicando la ecuación adecuada y escogiendo la wavelet madre Daubechies de orden 6 (db6), se obtiene la siguiente gráfica:



**Gráfico 28.** Representación gráfica de diferente ángulo. [61]



**Gráfico 29.** Transformada wavelet continua vista otro diferente ángulo. [65]

En la Gráfica 25, queda demostrado que la variable escala es inversamente proporcional a la frecuencia, puesto a que en la primera parte de la señal no estacionaria, el eje de la escala presenta valores altos a pesar de que la señal tiene una frecuencia de 5 Hz, en cambio el eje de la escala muestra valores bajos para la segunda parte de la señal que posee una frecuencia de 100 Hz.

Y la variable traslación como se explicó en el literal 3.1.1, corresponde al tiempo al igual que la transformada de Fourier, o también este parámetro se lo puede considerar el lugar en donde se encuentra la wavelet madre.

### 3.3 Transformada Wavelet semidiscreta

En la práctica, es más conveniente considerar la WT en algunos valores discretos de  $a$  y  $b$ . Por ejemplo, la escala diádica corresponde a la definición de los parámetros  $a = 2^j$ ,  $b = 2^j k$ , con  $(j, k) \in \mathbb{Z}^2$  denominándose transformada Wavelet semidiscreta (SWT).

La transformada será reversible si se cumple:

$$A\|f\|^2 \leq \sum_{a,b} |\langle f, \Psi(\tau, s) \rangle|^2 \leq B\|f\|^2 \quad (3.5)$$

Donde A y B son dos constantes positivas y f (t) sigue siendo una función continua.

### 3.4 Transformada Wavelet discreta.

Sea la señal a analizar f[n] una función discreta. En este caso la transformada Wavelet de esta señal viene dada por:

$$C[j, k] = \sum_{n \in \mathbb{Z}} f[n] \Psi_{j,k}[n] \quad (3.6)$$

Donde  $\Psi_{j,k}$  una wavelet discreta definida como:

$$\Psi_{j,k}[n] = 2^{-\frac{j}{2}} \cdot \Psi[2^{-j} n - k] \quad (3.7)$$

Los parámetros  $\tau, s$  están definidos según la escala diádica, de manera que  $\tau = 2^j$ ,  $s = 2^j k$ , con la diferencia respecto a la SWT que la señal bajo estudio es discreta. La transformada inversa se define de forma similar como:

$$f[n] = \sum_{j \in \mathbb{Z}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} C[j, k] \cdot \Psi_{j,k}[n] \quad (3.8)$$

Si las constantes indicadas son A = B = 1, entonces la transformada es ortogonal. Estas wavelets pueden ser construidas mediante un análisis multiresolución, que en el capítulo 3 se introducirá. Serán el tipo de transformada a utilizar en este trabajo, debido a su facilidad de implementación en ordenadores.

#### 3.4.1 Ejemplo de aplicación de la CWT

En esta sección se explicará la ecuación que define la CWT. f(t) es la señal que se analizará. La wavelet madre se elige entre un conjunto de funciones que se utilizan para este propósito (Morlet, sombrero mexicano, Daubechies, etc.) y tal como se ha comentado anteriormente cumple el papel de prototipo para todas las

ventanas que participan en el proceso, puesto que todas estas ventanas son las versiones dilatadas ( o comprimidas) y desplazadas de la wavelet madre .

Una vez que se ha elegido la wavelet madre el proceso de cálculo comienza con  $s = 1$  y la transformada wavelet continua se evalúa para todos los valores de  $s$ , menores y mayores que 1. Sin embargo, dependiendo de la señal, comúnmente no es necesario el cálculo completo de la transformada (todas las escalas), puesto que para la mayoría de los casos prácticos las señales tienen una banda limitada, por este motivo la evaluación de la transformada para un intervalo limitado de escalas es muchas veces suficiente.

Por razones de conveniencia, el proceso comienza a partir de la escala  $s = 1$  y continúa con valores crecientes de  $s$ , es decir el análisis parte desde las altas frecuencias hacia las bajas frecuencias. El primer valor de  $s$  corresponderá a la wavelet más comprimida y a medida que el valor de  $s$  se va incrementando la wavelet comenzará a dilatarse.

La wavelet se localiza al comienzo de la señal en el punto que corresponde a tiempo igual a 0. La función wavelet con escala  $s = 1$  se multiplica por la señal y se integra en todo el tiempo. El resultado de esta integración se multiplica luego por un valor constante  $1/\sqrt{s}$ ; el fin de esta multiplicación es que la señal transformada tenga la misma energía en cada escala, por ello que este producto actúa como normalización energética. El resultado final de este proceso es el valor de la transformación, es decir, el valor de la transformada wavelet continua en el instante  $t = 0$  y para la escala  $s = 1$ . En otras palabras, es el valor que corresponde para  $\tau = 0$  y  $s = 1$  en el plano tiempo-escala.

Posteriormente, la wavelet con escala  $s = 1$  es desplazada ( $\tau$ ) hacia la derecha hasta la localización  $t = \tau$  y el proceso se repite a fin de obtener el valor de la transformada para  $t = \tau$  y  $s = 1$  en el plano tiempo-frecuencia.

El procedimiento anterior se repite hasta que la wavelet alcanza el final de la señal, por lo tanto en esta etapa se habrá completado una fila de puntos en el plano tiempo escala correspondiente a la escala  $s = 1$ .

A continuación, se incrementa el valor de la escala  $s$ , como se está evaluando una transformada continua tanto  $\tau$  como  $s$  deben incrementarse continuamente; sin embargo, si la transformada se evalúa por un computador entonces ambos parámetros se incrementan por un paso lo suficientemente pequeño, que corresponderá al muestreo del plano tiempo-frecuencia.

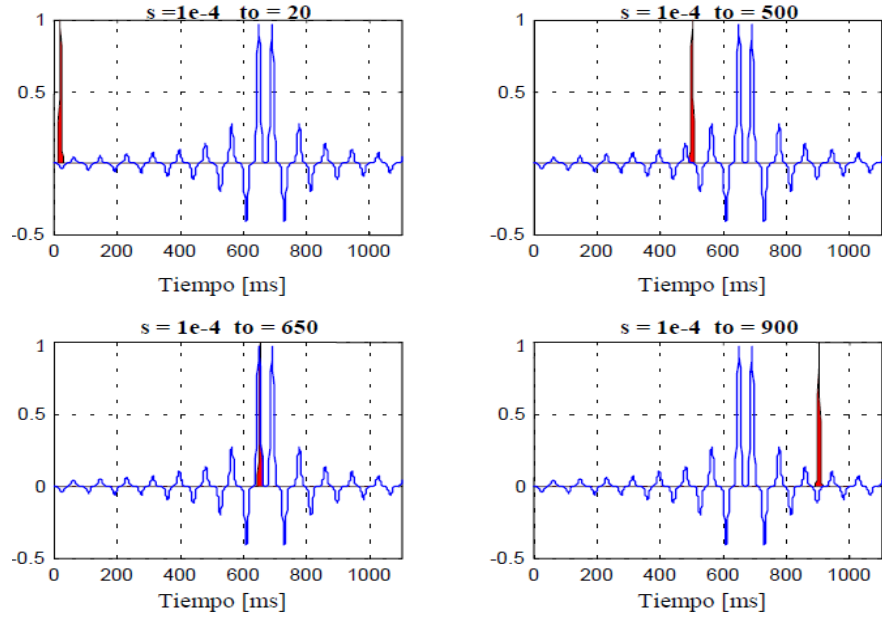
El proceso descrito anteriormente se repite para cada valor de  $s$ , con lo que se obtienen para cada  $s$  dado las correspondientes filas el plano escala-tiempo. Cuando el proceso se completa para todos los valores deseados de  $s$  la CWT de la señal ha sido finalmente obtenida.

La Gráfica 27 muestra la señal y la función wavelet para cuatro valores diferentes de  $\tau$ . En este caso el valor de la escala es  $s = 0.0001$  que corresponde a la escala menor o a las frecuencias más altas. Es importante destacar lo compactas que son (figuras en rojo). Esta ventana debiera ser más angosta a medida que aumentan las componentes de alta frecuencia existentes en la señal. Las cuatro localizaciones distintas de la función wavelet se muestran en la figura en los instantes  $\tau = 20$ ,  $\tau = 500$ ,  $\tau = 650$  y  $\tau = 900$ . En cada una de estas ubicaciones la función wavelet es multiplicada por la señal. Obviamente, el producto es distinto de cero solamente en la zona de intersección entre la señal y la wavelet; al desplazar la wavelet en el tiempo, la señal es localizada en el tiempo y al variar el valor de  $s$  la señal es localizada en escala (frecuencia).

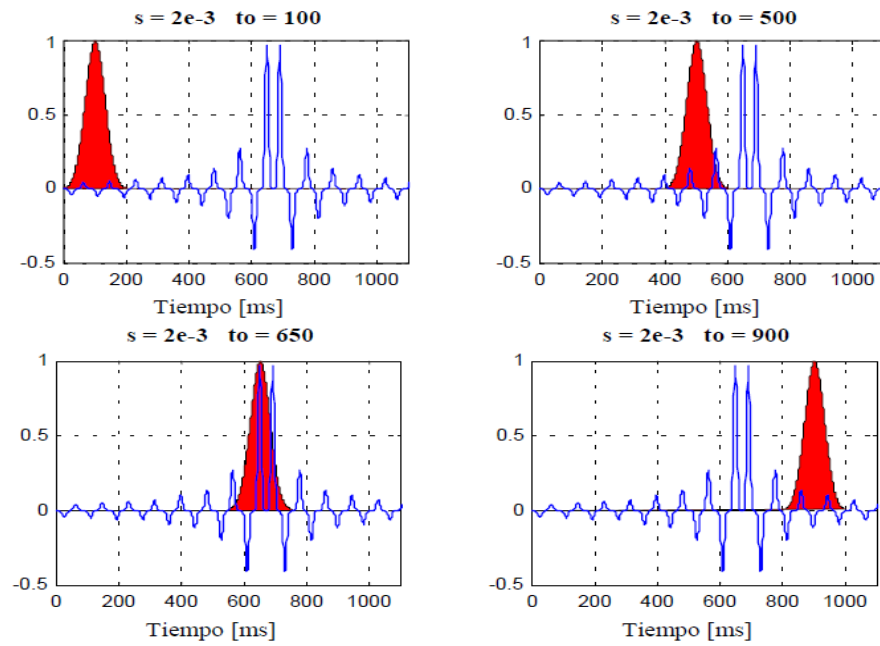
Si la señal tiene una componente espectral que corresponda a un determinado valor de  $s$  ( $s = 0.0001$  en este ejemplo), el producto entre la wavelet y la señal en la localización donde existe esta componente espectral dará origen a un valor relativamente alto, por el contrario si la señal NO tiene una componente espectral que corresponda a un determinado valor de  $s$  entonces este producto será prácticamente cero. La señal en la Fig. 2.7 tiene componentes espectrales comparables con el ancho de las ventana para  $s = 0.0001$  y  $t = 650$  ms.

La transformada Wavelet continúa de la señal de la Gráfica 27 dará como resultado valores altos para las escalas bajas en torno a los 600 ms. y valores

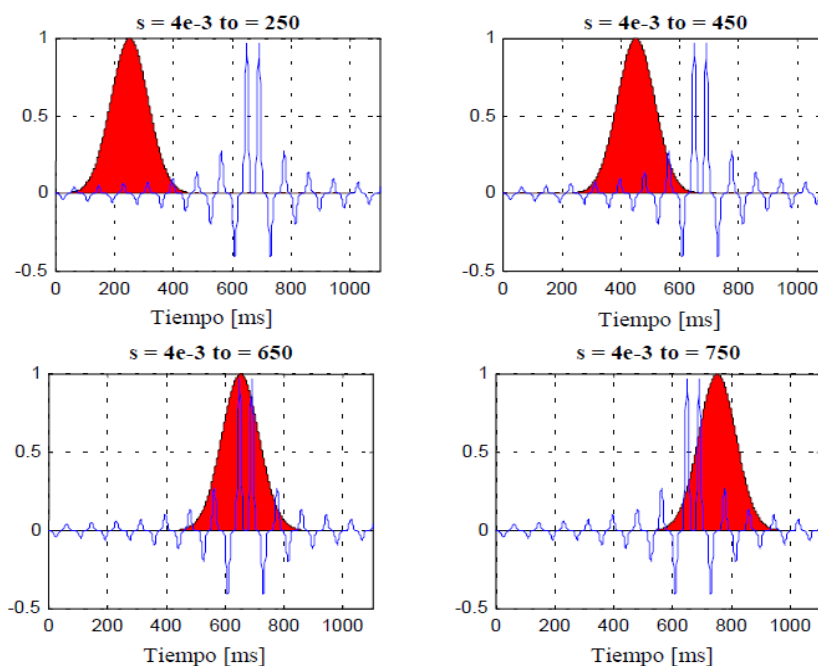
pequeños en los demás casos. Por otro lado, para las escalas altas la transformada Wavelet continua producirá valores altos para casi toda la duración de la señal, debido a la existencia de bajas frecuencias durante todo el tiempo.



**Gráfico 30.** Forma de cálculo de la CWT para  $s = 0.0001$  de la función wavelet y distintos valores de  $\tau$ . [66]



**Gráfico 31.** Forma de cálculo de la CWT para  $s = 0.002$  de la función wavelet y distintos valores de  $\tau$ . [66]



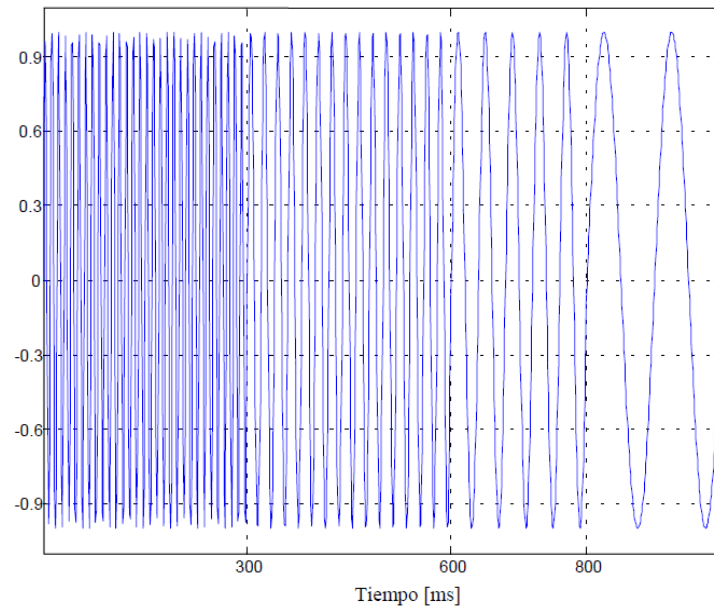
**Gráfico 32.** Forma de cálculo de la CWT para  $s = 0.004$  de la función wavelet y distintos valores de  $\tau$ . [66]

Las Fig. 28 y 29 muestran el mismo proceso para las escalas  $s = 0.002$  y  $s = 0.004$ , respectivamente. Observe cómo cambia el ancho de la ventana a medida que incrementa la escala (disminución de la frecuencia), al igual que al aumentar el ancho de la ventana, la transformada comienza a coger las componentes de bajas frecuencias.

Como resultado, para cada escala y cada intervalo de tiempo se determina un punto del plano tiempo-escala. Los cálculos realizados con una escala dan origen a las filas del plano tiempo-escala y los cálculos realizados con diferentes escalas originan las columnas del plano tiempo-escala.

A continuación se presenta un ejemplo de cómo se podría observar el resultado final de la aplicación de la transformada wavelet a una señal no estacionaria como la que se muestra en el Gráfico 31.

Señal no estacionaria con contenido de 10, 25, 50 y 100 Hz.



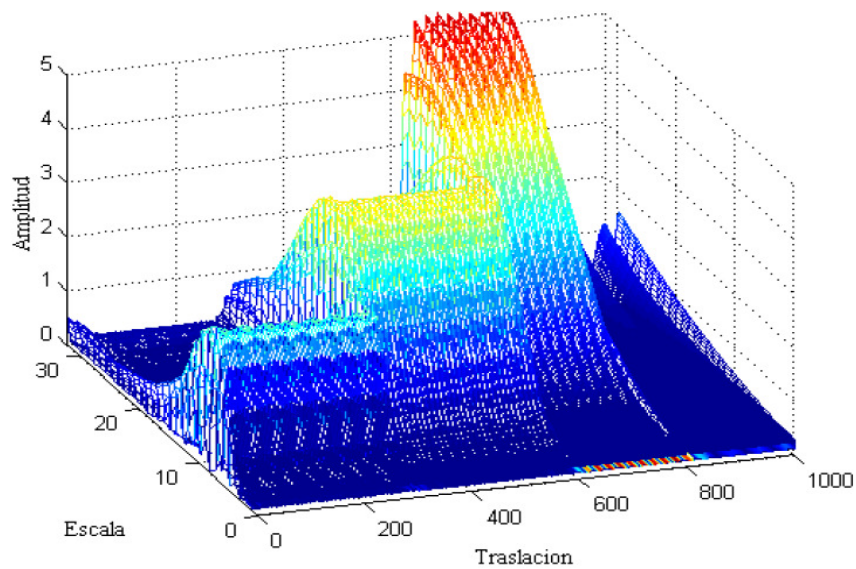
**Gráfico 33.** Señal no estacionaria de 10, 25, 50 y 100 Hz. [66]

En el Gráfico 31 se muestra el resultado de la transformada wavelet continua de esta señal. Observe que los ejes están escalados y trasladados, no aparece el tiempo ni la frecuencia, pero la traslación está estrechamente ligada al tiempo, ya que esto indica donde está localizada la wavelet madre.

La traslación de la wavelet madre puede considerarse como el tiempo que transcurre desde  $t = 0$ .

La escala se interpreta como el inverso de la frecuencia, es decir, todas las propiedades de la transformada wavelet respecto a la resolución en frecuencia aparecerán de manera inversa en las figuras que muestran la WT de una señal en el dominio del tiempo.

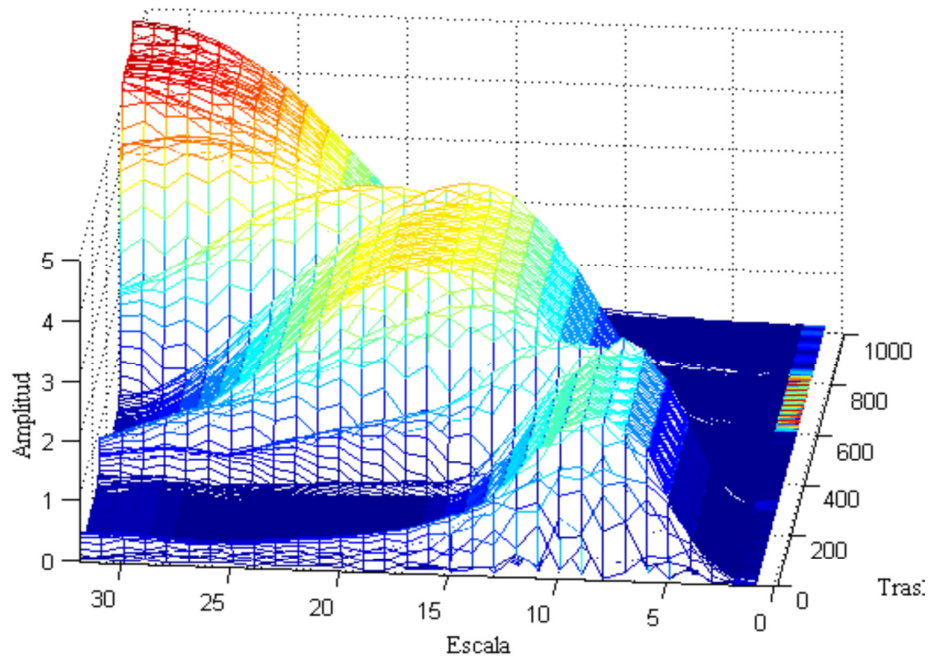




**Gráfico 34.** Transformada wavelet continua de la señal del Gráfico. 30. [66]

Además en el Gráfico 31 puede observarse que las escalas menores corresponden a frecuencias mayores, en otras palabras la frecuencia disminuye a medida que la escala aumenta, por lo tanto, las partes del gráfico con escalas cercanas a cero corresponderán a las altas frecuencias en el análisis y aquellas partes con escalas mayores corresponderán a frecuencias menores.

Nótese que la primera componente de la señal que tenía una frecuencia de 100 Hz. (la mayor frecuencia) aparece en las escalas menores y en una traslación entre 0 y 300, luego aparece la componente de 50 Hz. y así sucesivamente hasta la componente de 10 Hz. que aparece al final del eje de traslación y con altas escalas, es decir bajas frecuencias tal como se esperaba.



**Gráfico 35.** Transformada wavelet continúa de la señal de la Fig. 30 con ángulo de giro adecuado para mejor visualización. [66]

Ahora bien, es posible interpretar estas propiedades de resolución: a diferencia de la STFT la que tiene una resolución constante para cualquier tiempo en frecuencia, la WT para las altas frecuencias tiene una buena resolución en el tiempo y una baja resolución en frecuencia, sin embargo para las bajas frecuencias sucede lo contrario, es decir la WT tiene una mala resolución en el tiempo y una buena resolución en frecuencia. El Gráfico. 32 muestra la misma WT, pero vista desde otro ángulo para ilustrar mejor las propiedades de resolución. En el Gráfico. 32, las escalas inferiores (altas frecuencias) tienen mejor resolución de escala, lo que corresponde a bajas resoluciones de frecuencia. Similarmente, las altas escalas tienen una resolución de frecuencia escalada, lo que contribuye a mejorar la resolución en frecuencias de las componentes de frecuencias más bajas.

Los ejes en los Gráficos. 31 y 32 están normalizados, aproximadamente 1000 puntos en el eje de traslación corresponden a 1000 ms. y 32 puntos en el eje de la escala corresponden a una banda de frecuencia de 100 Hz. Los números en los

ejes de la escala y la traslación no corresponden a Hz. y segundos, respectivamente, sólo corresponden al número de muestras en el cálculo.

### 3.5 Desarrollo de la herramienta de análisis de caudales mediante Wavelets.

Para el análisis de las señales de caudal que se propone en el presente trabajo de tesis, a rigor requerimos de un método de análisis que permita resolver con rapidez, cálculos matemáticos de alta complejidad y además que tenga su representación gráfica.

Los resultados de esta manera pueden ser concluyentes, no siempre satisfactorios, pero que si nos permite tomar decisiones en cuanto a la conclusión de su ejecución.

Lo particular del trabajo y sobre las condiciones de análisis propuestas en este trabajo ha llevado a elegir un programa informático matemático como MATLAB.

MATLAB es un programa interactivo para computación numérica y visualización de datos. Es ampliamente usado por Ingenieros de Control en el análisis y diseño, posee además una extraordinaria versatilidad y capacidad para resolver problemas en matemática aplicada, física, química, ingeniería, finanzas y muchas otras aplicaciones. Está basado en un sofisticado software de matrices para el análisis de sistemas de ecuaciones. Permite resolver complicados problemas numéricos sin necesidad de escribir un programa. MATLAB es un entorno de computación y desarrollo de aplicaciones totalmente integrado orientado para llevar a cabo proyectos en donde se encuentren implicados elevados cálculos matemáticos y la visualización gráfica de los mismos. [61]

MATLAB integra análisis numérico, cálculo matricial, proceso de señal y visualización gráfica en un entorno completo donde los problemas y sus soluciones son expresados del mismo modo en que se escribirían tradicionalmente, sin necesidad de hacer uso de la programación tradicional. El

nombre de MATLAB proviene de la contracción de los términos MATrix LABoratory y fue inicialmente concebido para proporcionar fácil acceso a las librerías LINPACK y EISPACK, las cuales representan hoy en día dos de las librerías más importantes en computación y cálculo matricial. [62]

MATLAB goza en la actualidad de un alto nivel de implantación en escuelas y centros universitarios, así como en departamentos de investigación y desarrollo de muchas compañías industriales nacionales e internacionales. En entornos universitarios, por ejemplo, MATLAB se ha convertido en una herramienta básica, tanto para los profesionales e investigadores de centros docentes, como una importante herramienta para la impartición de cursos universitarios, tales como sistemas e ingeniería de control, álgebra lineal, proceso digital de imagen, análisis de señales, etc.

MATLAB está siendo utilizado como herramienta de investigación para la resolución de complejos problemas planteados en la realización y aplicación de modelos matemáticos en ingeniería. Los usos más característicos de la herramienta los encontramos en áreas de computación y cálculo numérico tradicional, prototipo algorítmico, teoría de control automático, estadística, análisis de series temporales para el proceso digital de señal. [62]

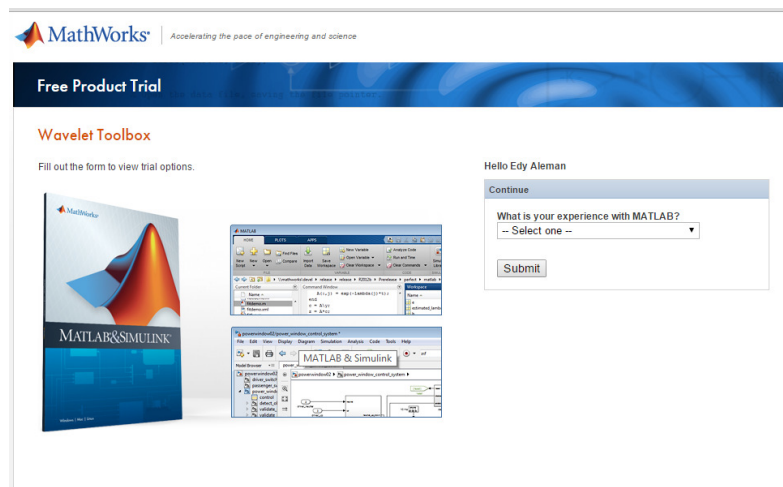
Es importante entender para el presente trabajo como MATLAB emplea matrices y el por qué con ellas se puede describir infinidad de cosas de una forma altamente flexible y matemáticamente eficiente. Una matriz de pixeles puede ser una imagen o una película. Una matriz de fluctuaciones de una señal puede ser un sonido o una voz humana. Y tal vez más significativamente, una matriz puede describir una relación lineal entre los componentes de un modelo matemático. En este último sentido, una matriz puede describir el comportamiento de un sistema extremadamente complejo. Por ejemplo, una matriz puede representar el vuelo de un avión a 40.000 pies de altura, o un filtro digital de procesamiento de señales. Aquí es determinante saber, como usar esta poderosa herramienta para modelar matemáticamente nuestro entorno. [62]

También es importante decir que MATLAB dispone también en la actualidad de varios programas de apoyo especializado, denominado “Toolbox”, que extienden significativamente el número de funciones incorporadas en el programa principal. Estos “Toolboxes” cubren en la actualidad prácticamente casi todas las áreas principales en el mundo de la ingeniería y la simulación, destacando entre ellos el “toolbox” de proceso de imágenes, señal, control robusto, estadística, análisis financiero, matemáticas simbólicas, redes neurales, lógica difusa, identificación de sistemas, simulación de sistemas dinámicos, etc.

Además también se dispone del programa Simulink que es un entorno gráfico interactivo con el que se puede analizar, modelizar y simular la dinámica de sistemas no lineales. [63]

Ya para terminar la descripción del programa y para conocimiento general, MatLab fue originalmente desarrollado en lenguaje FORTRAN, para ser usado en computadoras mainframe. Fue el resultado de los proyectos Linpack y Eispack desarrollados en el Argonne National Laboratory. Como se dijo anteriormente el nombre proviene de MATrix LABoratory y al pasar de los años fue complementado y reimplementado en lenguaje C. Actualmente la licencia de MatLab es propiedad de MathWorks Inc. [62], se lo puede descargar como trial; el proceso es fácil, solo tenemos que inscribirnos en su página y luego realizar la descarga, claro está con las indicaciones sobre capacidad del equipo con el que vamos a trabajar. Si nos encontramos en una institución educativa MathWorks tiene convenios especiales de licenciamiento, una vez ubicado en este sitio se ingresa el correo asignado por la institución educativa y se realiza el procedimiento de descarga al computador. Las indicaciones son claras.

Es fundamental que la computadora donde se instale no tenga versiones anteriores adulteradas o que tengan deficiencias en cuanto al arranque o corrida de las herramientas que el programa posee.



**Gráfico 36.** Acceso a la descarga del trial [Por el autor]

### 3.5.1 Aplicaciones generales de MATLAB

La idea de esta descripción breve es resumir las áreas de aplicación de manera general donde puede ser aplicado los comandos, expresiones y variables que posee MATLAB, así como sus características.

#### Funciones matemáticas

- Funcionales especiales y elementales
- Funciones gamma, beta y elípticas.
- Transformación de sistemas de coordenadas.
- Matriz identidad y otras matrices elementales.
- Matrices de Hilbert, Toeplitz, Vandermonde, Hadamard, etc.
- Partes reales, imaginarias y complejas conjugadas.
- Funciones trigonométricas y de potencias.

#### Algebra lineal numérica

- Valores propios y descomposición de matrices.
- Funciones generales de evaluación de matrices.
- Determinantes, normas, rangos, etc.
- Matrices inversas y factorización de matrices.
- Matriz exponencial, logarítmica y raíces cuadradas.

#### Polinomios e interpolación

- Interpolación 1 -D y 2-D.
- Construcción polinomial.
- Interpolación por splines cúbicos.
- Diferenciación de polinomios.
- Evaluación de polinomios.
- Multiplicación y división de polinomios.
- Residuos de polinomios y residuos.

#### Métodos numéricos no lineales

- Búsqueda de ceros en funciones de una única variable.
- Minimización de funciones de una o más variables.
- Resolución numérica de integrales.
- Solución numérica de ecuaciones diferenciales ordinarias.

#### Estadística y análisis de Fourier

- Convolución 1 -D y 2-D.
- Filtros digitales 1-D y 2 -D.
- Transformadas de Fourier 1 -D y 2-D y su inversa.
- Coeficientes de correlación y matrices de covarianza.
- Deconvolución.
- Magnitudes y ángulos de fase.
- Funciones max, min, sum, mean y otras funciones de estadística básica.

#### Operaciones algebraicas y lógicas

- Suma, resta, multiplicación, división y potencias de matrices.
- Matrix traspuesta.
- Operadores lógicos AND, OR, NOT y XOR.

#### 3.5.2 Vectores y Matrices.

Ya se ha referido que MATLAB dentro de sus aplicaciones es un programa para

cálculo matricial, por lo mismo se hizo uso de esta parte para facilitar el manejo de ingreso de datos, que en este punto del análisis es importante suministrar la adecuada información en la entrada del programa. Aparte de esto MATLAB se le puede tomar como una potente calculadora matricial (comentario muy limitado para el alcance del programa).

Solo como una pequeña introducción a continuación se describirá de forma práctica la manera de introducir matrices y vectores en el programa. Más adelante se verán otras formas más potentes de definir matrices y vectores.

Los vectores y matrices en MATLAB se trabajan igual en cuanto a asignación, por eso se explican juntos. Pero las operaciones posibles, si son diferentes, y están separadas bajo los encabezados correspondientes.

- Asignación:

La asignación de variables en MATLAB es sencilla, y los vectores y matrices no son la excepción. Cuando se desea dar el valor a toda una matriz se puede realizar directamente de la siguiente forma:

$A = [1 \ 2 \ 3 \ 4; 5 \ 6 \ 7 \ 8; 9 \ 0 \ 1 \ 2];$

Ó

$A = [1, 2, 3, 4; 5, 6, 7, 8; 9, 0, 1, 2];$

donde, la matriz escrita arriba es:

1	2	3	4
5	6	7	8
9	0	1	2

Las filas se separan por punto y coma y las columnas por espacios o comas. De lo anterior se ve fácilmente que un vector fila se asigna así:

$v=[1 \ 2 \ 3];$  ó



`v=[1, 2, 3];`

Y un vector columna se asigna así:

`v = [1; 2; 3];`

- Manejo de subíndices:

Otra forma de asignar valores a una matriz (o un vector) es por medio de los subíndices. El menor subíndice utilizado por MATLAB es 1. Y va añadiendo valores a medida que se requieran. Los subíndices se escriben entre paréntesis. Para identificar un elemento de una matriz se usa la notación  $A(i,j)$  dónde  $i$  es la  $i$ -ésima fila y  $j$  es la  $j$ -ésima columna.

Por ejemplo:

`A(2, 3)=1;`

Asigna al elemento en la fila 2, columna 3 el valor de 1.

Si se desea cambiar todo el valor de una fila o una columna, es muy sencillo hacerlo con el operador ":" así:

`A(1,:)= [4 5 6];`

Asigna a la fila 1 el vector [4, 5, 6] (cambia la fila 1 por 4, 5, 6).

Así si A era una matriz de 3x3 de ceros, ahora queda:

4	5	6
0	0	0
0	0	0

Igualmente a veces se requiere trabajar con vectores que son una

columna o una fila de una matriz. Esto se realiza fácilmente guardando este "vector" en un vector, así:

```
V = A(:,1);
```

Asigna al vector v la primera columna (completa) de la matriz A.

- Operaciones matemáticas simples con matrices y vectores:

Esto es algo en lo que MATLAB hace las cosas verdaderamente simples, si se tienen dos matrices (o vector y matriz, o dos vectores), y se quieren: sumar, multiplicar ó restar sólo es necesario anotar esta operación normalmente, como se haría con números. Por ejemplo: Si se quieren multiplicar dos matrices A y B y almacenar el resultado en C:

```
C=A*B;
```

Si se hace entre dos vectores; uno fila y el otro columna, el resultado es el producto punto entre los dos.

Si se quieren sumar ó restar y almacenar el resultado en C:

```
C=A+B; ó
```

```
C=A-B;
```

Sin importar que sean matrices o vectores.

### 3.5.3 Toolbox de MATLAB.

“Toolbox” es una 'caja de herramientas'; para nuestro caso, un grupo de funciones con cierta finalidad específica. Tal es el caso que encontramos una toolbox para procesamiento de imágenes, otra para problemas de optimización numérica, sistemas de control, para el procesamiento de señales; etc, En fin, Toolbox posee librerías de funciones asociadas a las diferentes aplicaciones. Por

ejemplo, en el procesamiento de señales el paquete incluye características de análisis como las que se mencionan a continuación:

- Análisis de filtros digitales incluyendo respuesta en frecuencia, retardo de grupo, retardo de fase.
- Implementación de filtros, tanto directo como usando técnicas en el dominio de la frecuencia basadas en la FFT.
- Diseño de filtros IIR, incluyendo Butterworth, Chebyshev tipo I, Chebyshev tipo II y elíptico.
- Diseño de filtros FIR mediante el algoritmo óptimo de Parks-McClellan.
- Procesamiento de la transformada rápida de Fourier FFT, incluyendo la transformación para potencias de dos y su inversa, y transformada para no potencias de dos.

Para el análisis mediante Wavelet (Wavelet toolbox) le permite explorar las propiedades y aplicaciones; tal como, procesamiento de voz y audio, procesamiento de imagen y video, imágenes biomédicas, aplicaciones en comunicaciones y geofísica de 1-D y 2-D. Amplía el entorno de cálculo técnico de MATLAB con herramientas gráficas y funciones de línea de comandos para el desarrollo de Wavelet mediante algoritmos para el análisis, la síntesis, eliminación de ruido y la compresión de señales e imágenes. El análisis Wavelet proporciona información más precisa sobre datos de la señal que otras técnicas de análisis de señales, tales como Fourier. [64]

A continuación se especifica características principales de “Wavelet toolbox”:

- Familias wavelet estándar, incluyendo filtros wavelet Daubechies, Morlet complejo y Gauss, verdadero reverso biortogonal, y discreta Meyer.
- Wavelet y utilidades de procesamiento de señales, incluyendo la función

de convertir la escala a la frecuencia.

- Los métodos para añadir familias wavelet.
- Métodos de elevación para la construcción de wavelet.
- Presentación personalizable y visualización de datos.
- Herramientas interactivas para el análisis wavelet continua y discreta.
- Paquetes Wavelet, implementados como objetos de MATLAB.
- Análisis unidimensional de una multiseñal, compresión y eliminación de ruido.
- Análisis multiescala por componentes principales.
- Eliminación de ruido multivariable.

La interfaz gráfica de Wavelet (GUI) proporciona un conjunto completo de herramientas para el análisis de señales 1-D y 2-D, incluyendo herramientas para el análisis de ondas, análisis de paquetes de ondas, eliminación de ruido y compresión. La wavelet toolbox posee 15 familias wavelet estándares para el análisis. [64]

## CAPITULO IV

### 4 APLICACIÓN DEL MODELO

La central Agoyán como central de pasada fue concebida para aprovechar el caudal del Río Pastaza, localizada en la provincia de Tungurahua a 180 km, al sureste de Quito y a 5 km al este de la ciudad de Baños en el sector denominado Agoyán de la parroquia Ulba, en la vía principal de entrada al sector amazónico del Ecuador. [65]

En la cuenca del río Pastaza tiene una extensión de  $8270 \text{ km}^2$ , en las provincias de Cotopaxi, Chimborazo y Tungurahua. [65]

La extensión global de la zona de influencia de la Central Hidroeléctrica es de  $5.00 \text{ km}^2$  con una producción media anual de 1.080 GWH. [65]

El máximo del embalse se encuentra a una altitud de 1651 m.s.n.m. [65]

#### 4.1 Descripción de emplazamientos y series de caudales.

En el estudio de embalses se hace una descripción detallada de las condiciones y características geológicas e hidrogeológicas locales de los posibles emplazamientos, sean estos naturales o artificiales.

Para valorar los posibles emplazamientos se deben considerar, aspectos de repercusión económica, los descensos de niveles, el orden medioambiental y otros que sin ser menos importantes deben tomarse en cuenta. (Accesos, afección a terceros; etc.)

A continuación se describe la estadística de los datos históricos y la representación gráfica de la serie temporal de la central desde el año 1997 hasta inicios del 2015. En los anexos se puede encontrar un resumen mensual, aunque en la tesis se ha trabajado con datos diarios de caudal (6580 datos).

Estadística Descriptiva	HISTÓRICA
Media	120,06
Error típico	0,96
Mediana	101,00
Desviación estándar	78,01
Varianza de la muestra	6.086,22
Curtosis	30,38
Coefficiente de asimetría	4,08
Mínimo	30,00
Máximo	1.111
Cuenta	6.580

Tabla 4. Resumen estadístico de datos históricos

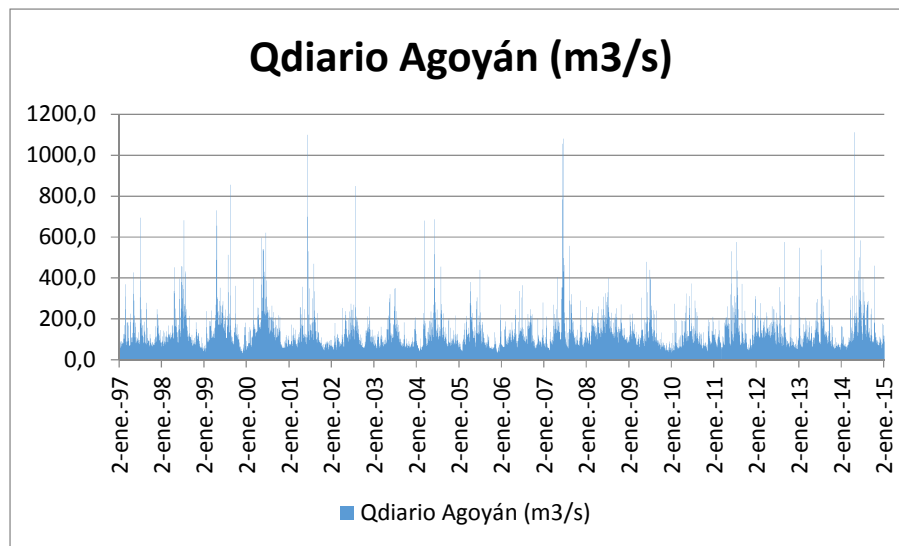


Gráfico 37. Caudal diario total [Por el autor]

#### 4.1.1 Construcción y validación de una base datos de caudales:

Esta validación y construcción de información tiene por objetivo aplicar técnicas de homogenización y control de consistencia de la información sobre las estaciones pluviométricas disponibles para la zona determinada de estudio. A continuación se menciona algunos de los métodos más usados.

#### 4.1.1.1 Análisis Espacial

El objetivo de este análisis es la generación de patrones espaciales mediante la aplicación de técnicas de agrupación espacial, en este caso análisis de clúster, que permitan agrupar conjuntos de estaciones que posean un comportamiento hidrológico o climático similar.

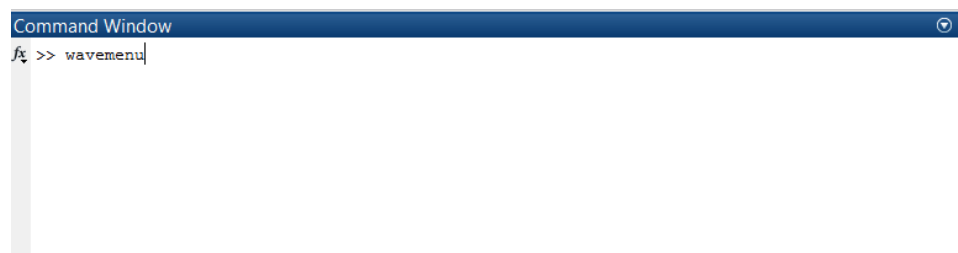
#### 4.1.1.2 Análisis Temporal

En este nivel se analizan las series de tiempo generadas de los patrones espaciales encontrados. Se analiza la existencia de tendencias y periodicidades de ciclos no regulares estadísticamente significativos y su relación con los índices climáticos, para diferentes agrupaciones estacionales (época lluviosa, época seca).

#### 4.2 Análisis espectral de la series de caudales y representación.

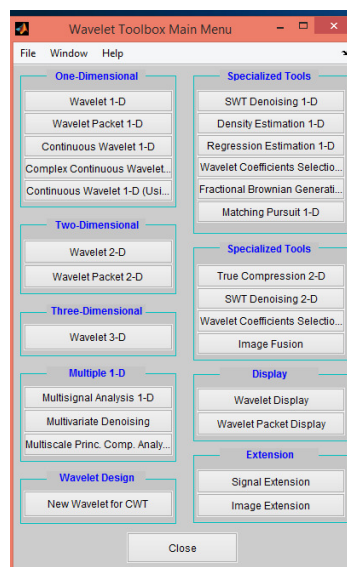
Como se ha comentado en el anterior capítulo, se hizo uso de una herramienta matemática como MatLab, que al ser un programa orientado a proyectos en los cuales se requiere cálculos matemáticos y visualización gráfica de los mismos, incluye una extensa variedad de programas de apoyo y del cual en esta ocasión se hace uso. Y como se había dicho, wavelets nos ayudará en el análisis, síntesis, eliminación del ruido y compresión de señales.

Luego de ingresar al ejecutable del programa MatLab se invoca a la caja de herramienta que usaremos para el análisis. En la ventana de comandos se escribirá la palabra wavemenu., tal como se muestra en la siguiente figura.



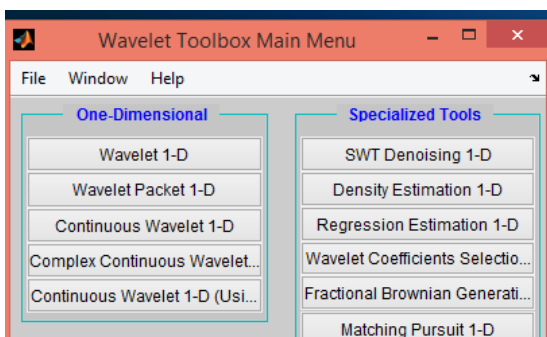
**Gráfico 38.** Ventana de comando de MatLab. [Por el autor]

Una vez introducido el comando el programa desplegará la siguiente pantalla:



**Gráfico 39.** Cuadro de selecciones

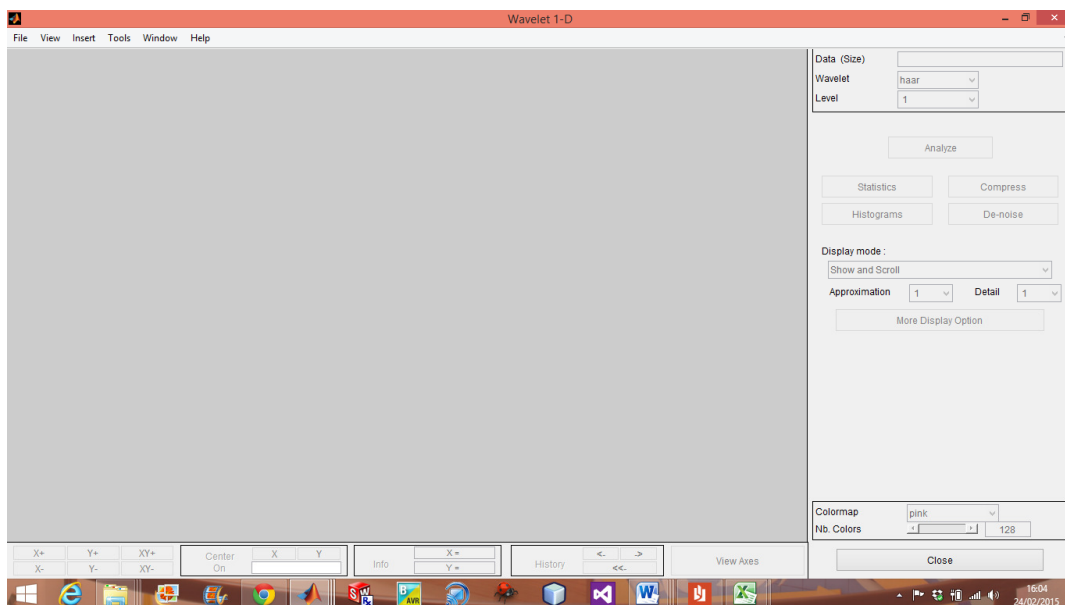
Por el tipo de análisis que se pretende realizar, se elige la primera opción, en el grupo de Unidimensional; es decir, Wavelet 1-D.



**Gráfico 40.** Selección de función. [Por el autor]

Una vez seleccionado esta opción se obtiene el siguiente cuadro de funciones

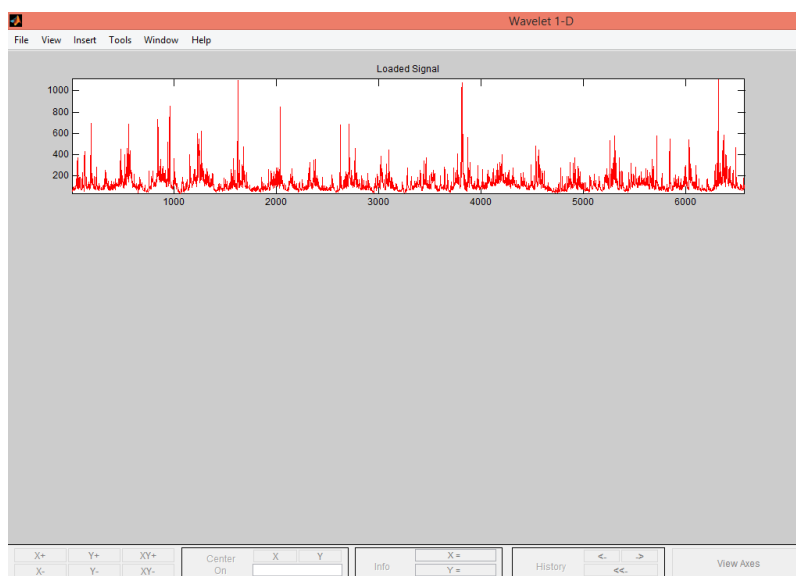




**Gráfico 41.** Ventana de despliegue de selección de análisis. [Por el autor]

Aquí se debe cargar el archivo donde se encuentra los datos que se desea analizar, para este caso este archivo contiene el historial diario de caudales desde el año 1997 hasta inicios del 2015 de la Central Agoyán.

Una vez que se direcciona el sitio de carga de datos se tiene la siguiente pantalla.



**Gráfico 42.** Despliegue de datos en programa. [Por el autor]

Los datos graficados en el programa no tienen ningún tipo de análisis en este momento, para empezar a analizar los datos desplegados hay que seleccionar el tipo de familia que tiene la caja de herramientas del programa.

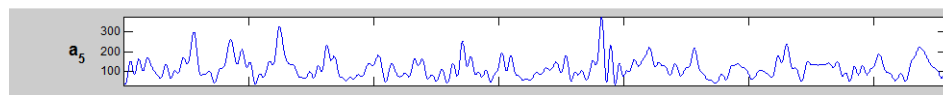
Se procedió a realizar el análisis con varias Wavelets madres, escogiéndose al final la Wavelet Meyer. En anexos se compara contra otras Wavelet madres.

Empleando la Wavelet Meyer se obtienen los siguientes resultados:



**Gráfico 43.** Despliegue de aproximaciones y descomposiciones. [Por el autor]

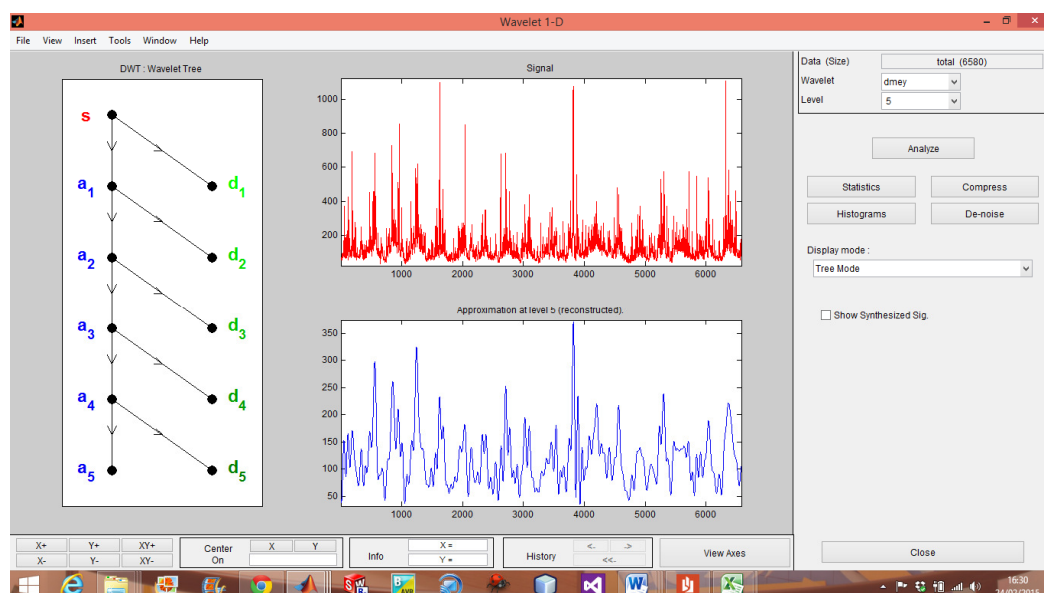
Como se puede observar, la descomposición permite obtener una representación de la señal original. Se ha utilizado la aproximación A5 para hacer el análisis.



**Gráfico 44.** Aproximación A5. [Por el autor]

De este análisis se obtendrá los datos para el tratamiento estadístico y con el que se realizará comparaciones más adelante en cuanto a la estimación de la energía.

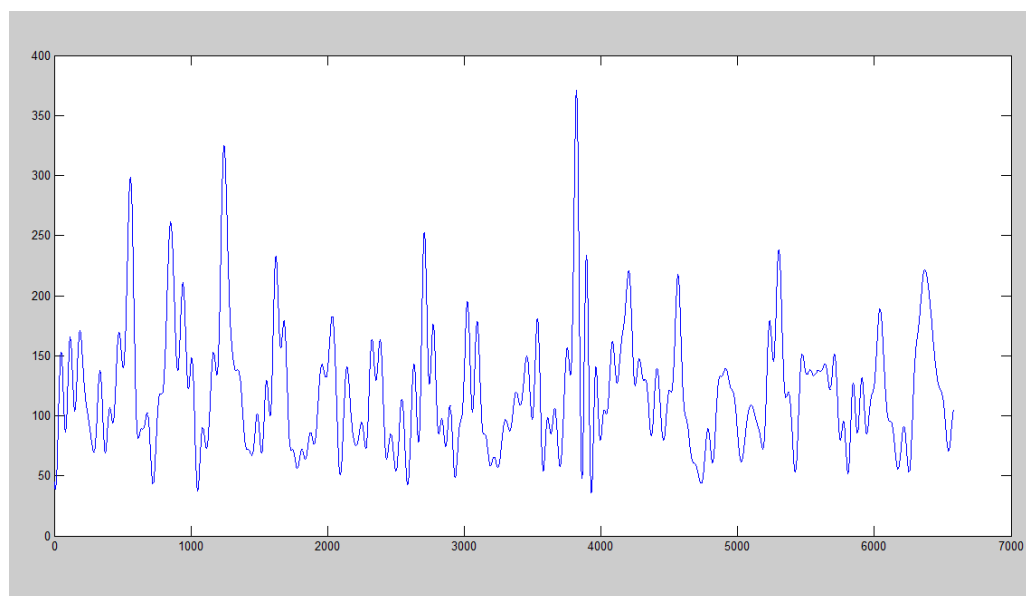
Los datos del programa deberán ser exportados a arreglo de vectores si se selecciona de este arreglo los datos de interés:



**Gráfico 45.** Despliegue análisis Wavelet DMeyer. [Por el autor]

Se muestra en este gráfico el tipo de modelo maneja esta familia de Wavelet, así como la descomposición seleccionada y con la que se ha probado mejores resultados.

A continuación se muestra la señal reconstruida a partir de la señal origen:



**Gráfico 46.** Señal recuperada de Wavelet Meyer. [Por el autor]

Los análisis posteriores se harán considerando esta representación.

#### 4.3 Análisis de desviaciones con otras metodologías.

En este apartado se presentará brevemente algunos fundamentos teóricos para comprender un poco los estimadores usados para caracterizar datos, todos estos conceptos serán de utilidad para comprender las bases sobre la que se desarrolla algunos estudios.

##### 4.3.1 Proceso Estocástico

Es un conjunto de variables aleatorias que dependen de un parámetro o argumento. En el análisis de series temporales el argumento es el Tiempo. Formalmente es una familia de variables aleatorias  $Y_t$  donde  $t$  denota el tiempo, tales que para cualquier elección finita de valores de  $t$ :  $t_1, t_2, \dots, t_n$  existe la distribución de probabilidad conjunta correspondiente a las variables aleatorias  $Y_{t_1}, Y_{t_2}, \dots, Y_{t_n}$ . [66]

Los procesos estocásticos son usados en fenómenos donde se contemplan variaciones aleatorias.

Una secuencia de datos, observaciones o valores, vinculados a una variable temporal, ordenados cronológicamente y espaciados de manera uniforme, se llama Serie Temporal. Ejemplos se presentan en las observaciones de variables climatológicas, fenómenos físicos, financieros, biológicos, por un determinado tiempo; es de resaltar que para un segmento del tiempo  $t_1$  se tiene una curva que representa una realización. Si, bajo las mismas condiciones, se realizan mediciones en otro segmento de  $t_2$ , se obtiene otra curva que por lo general no es igual a la primera. Cada conjunto de medidas define una trayectoria o realización del proceso que está siendo observado. Asumiendo algunas condiciones, como la ergodicidad, a partir de una realización (la serie histórica única que se tiene disponible en la práctica) es posible modelar este proceso físico usando un proceso estocástico. Con este modelo se abre la posibilidad de generar un conjunto de trayectorias que son posibles de ser observadas. En este contexto, cada una de estas trayectorias se denomina también una serie temporal.

#### 4.3.2 Simulación Cualitativa (Qualitative Simulation)

El objetivo de este método es analizar y aprender patrones observados en la máscara de correlación con el fin de predecir el comportamiento futuro en base a los datos históricos.

El pronóstico opera en dos etapas:

1) Etapa determinística:

El patrón de entrada para el pronóstico es extraído de la matriz de valores clase por medio de la máscara y es comparado con todos los patrones análogos de la matriz de comportamiento del sistema (datos históricos). Para todos aquellos patrones que coinciden con el patrón de entrada, se observan los valores clase de salida.

2) Etapa estadística:

Se realiza la predicción del valor más probable de salida, a partir de las observaciones anteriores, mediante un promedio ponderado de los valores más próximos en la base de datos de entrenamiento. En esta etapa se utiliza la regla 4-NN (4 más cercanos vecinos).

##### 4.3.2.1 Series temporales

Una secuencia de datos, observaciones o valores, vinculados a una variable temporal, ordenados cronológicamente y espaciados de manera uniforme, se llama Serie Temporal. Algunos ejemplos se presentan en las observaciones de variables climatológicas, fenómenos físicos, financieros, biológicos, por un determinado tiempo; es de resaltar que para un segmento del tiempo  $t_1$  se tiene una curva que representa una realización. Si, bajo las mismas condiciones, se realizan mediciones en otro segmento de  $t_2$ , se obtiene otra curva que por lo general no es igual a la primera. Cada conjunto de medidas define una trayectoria o realización del proceso que está siendo observado. Asumiendo algunas condiciones, como la ergodicidad, a partir de una realización (la serie

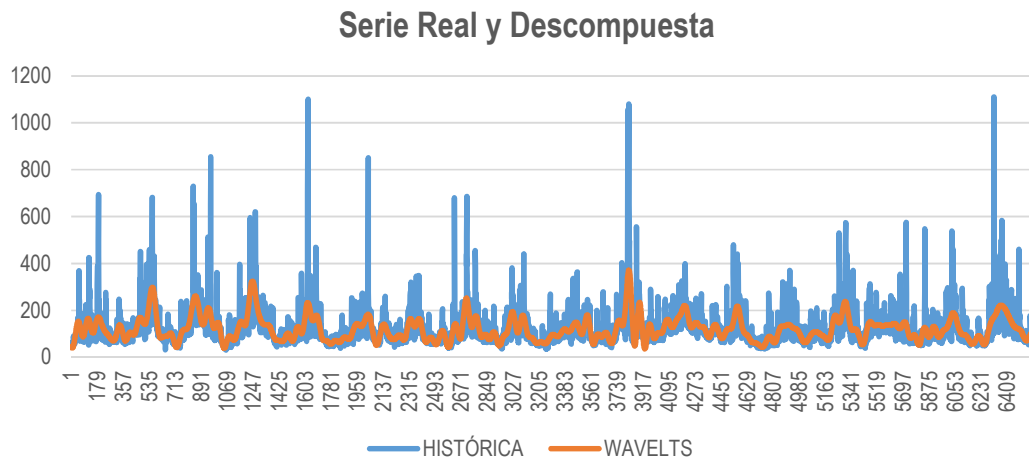
histórica única que se tiene disponible en la práctica) es posible modelar este proceso físico usando un proceso estocástico. Con este modelo se abre la posibilidad de generar un conjunto de trayectorias que son posibles de ser observadas. En este contexto, cada una de estas trayectorias se denomina también una serie temporal. [67]

Un proceso estocástico es descrito por el conjunto de todas las series temporales (o realizaciones) que lo componen, que son infinitas por lo general como se muestra al final del párrafo, o también por la distribución de probabilidades conjunta de todas las variables aleatorias que están en juego. En la realidad no se tiene ninguna de estas formas, queda el modelo de series sintéticas que busca ajustar un modelo, que se cree es el que género, a la serie histórica y a partir de este, generar series sintéticas que representan las series temporales que podrían ser “muestreadas” del proceso que se está analizando en la siguiente ecuación. [68]

$$\{y_t\}_{t=-\infty}^{\infty} = \{\dots, y_{-1}, y_0, y_1, \dots, y_T, y_{T+1}, y_{T+2}, \dots\}$$

#### 4.3.3 Estadística descriptiva comparada con Wavelet

En esta grafica se muestra las dos señales o grupo de señales que intervienen en el análisis.



**Gráfico 47.** Series Real comparadas con Wavelet Meyer. [Por el autor]

Estadística Descriptiva	HISTÓRICA	WAVELT S	% Diferencia
Media	120,06	120,04	0,0%
Error típico	0,96	0,61	-36,2%
Mediana	101,00	112,67	11,6%
Desviación estándar	78,01	49,74	-36,2%
Varianza de la muestra	6.086,22	2.474,52	-59,3%
Curtosis	30,38	2,55	-91,6%
Coefficiente de asimetría	4,08	1,26	-69,1%
Mínimo	30,00	35,79	19,3%
Máximo	1.111	371	-66,6%
Cuenta	6.580	6.580	0,0%

**Tabla 5.** Tabla de comparaciones

Se observa que la representación mediante Wavlet tiene un nivel de aproximación importante a la señal original, con la particularidad de que Wavelet representa mejor la serie de datos cuando se desea hacer análisis energéticos, puesto que se filtran valores extremos o ruido que pueden afectar el análisis.

#### 4.3.4 Análisis de los datos por método estadístico estocástico para la Central Agoyán

Los datos que a continuación resultan de un cálculo estadístico del caudal a partir de los datos ingresados que vienen del histórico de la central y por lo mismo pretende marcar la tendencia de caudal en el tiempo, de esta forma es posible tener una predicción del caudal en tiempos cortos de aproximación.

Altura Total del emplazamiento [Ht] (m):	150
------------------------------------------	-----

Años (n)	Datos (D)	Clases $N=1+3.3*\ln(D)$	Q <sub>máx</sub>	Q <sub>mín</sub>	(AC) $[Q_{max}-Q_{min}]/(N-1)$	$\Delta$ de Pot. (MW) $[9.8 * Ht * AC]$
0	6580	30	1.111,0	30,0	37,28	54,80

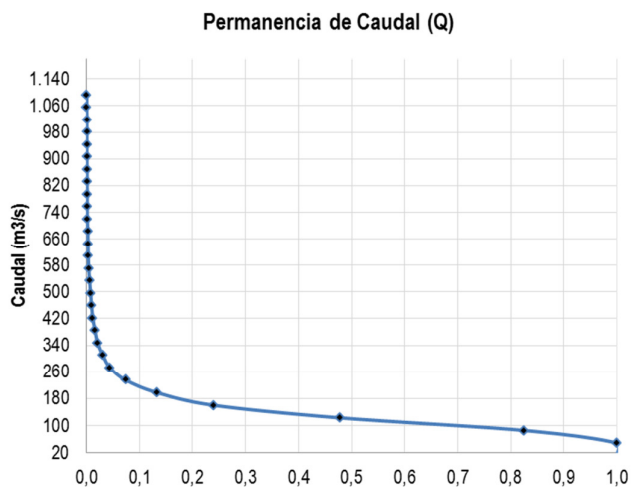
**Tabla 6.** Datos de análisis de emplazamiento de la central Agoyán

A continuación se muestra la aplicación del cálculo de clases para obtener caudales aproximados en el tiempo.

Clase	Qmáx	Qmín	Qmed	Ocurrencia	Frec. (p.u)	Permanencia	Pmáx	Pmín	Pmed	Δ Caudal	Qt
1	1.111,0	1.073,7	1.092,4	3	0,00	0,00	1.633	1.578	1.606	0,01	138,77
2	1.073,7	1.036,4	1.055,1	1	0,00	0,00	1.578	1.524	1.551	0,03	138,76
3	1.036,4	999,2	1.017,8	1	0,00	0,00	1.524	1.469	1.496	0,03	138,74
4	999,2	961,9	980,5	0	0,00	0,00	1.469	1.414	1.441	0,03	138,71
5	961,9	924,6	943,2	1	0,00	0,00	1.414	1.359	1.387	0,03	138,68
6	924,6	887,3	906,0	0	0,00	0,00	1.359	1.304	1.332	0,04	138,64
7	887,3	850,0	868,7	1	0,00	0,00	1.304	1.250	1.277	0,04	138,61
8	850,0	812,8	831,4	1	0,00	0,00	1.250	1.195	1.222	0,05	138,56
9	812,8	775,5	794,1	1	0,00	0,00	1.195	1.140	1.167	0,05	138,52
10	775,5	738,2	756,8	0	0,00	0,00	1.140	1.085	1.113	0,05	138,47
11	738,2	700,9	719,6	1	0,00	0,00	1.085	1.030	1.058	0,08	138,41
12	700,9	663,6	682,3	7	0,00	0,00	1.030	976	1.003	0,10	138,33
13	663,6	626,4	645,0	3	0,00	0,00	976	921	948	0,12	138,23
14	626,4	589,1	607,7	2	0,00	0,00	921	866	893	0,14	138,11
15	589,1	551,8	570,4	6	0,00	0,00	866	811	839	0,19	137,97
16	551,8	514,5	533,2	11	0,00	0,01	811	756	784	0,25	137,78
17	514,5	477,2	495,9	12	0,00	0,01	756	702	729	0,33	137,52
18	477,2	440,0	458,6	13	0,00	0,01	702	647	674	0,41	137,20
19	440,0	402,7	421,3	15	0,00	0,01	647	592	619	0,53	136,79
20	402,7	365,4	384,0	28	0,00	0,02	592	537	565	0,70	136,27
21	365,4	328,1	346,8	32	0,00	0,02	537	482	510	0,97	135,57
22	328,1	290,8	309,5	63	0,01	0,03	482	428	455	1,40	134,60
23	290,8	253,6	272,2	90	0,01	0,04	428	373	400	2,20	133,20
24	253,6	216,3	234,9	194	0,03	0,07	373	318	345	3,86	131,00
25	216,3	179,0	197,6	390	0,06	0,13	318	263	291	6,94	127,14
26	179,0	141,7	160,4	699	0,11	0,24	263	208	236	13,37	120,20
27	141,7	104,4	123,1	1.568	0,24	0,48	208	154	181	24,29	106,83
28	104,4	67,2	85,8	2.288	0,35	0,83	154	99	126	34,03	82,55
29	67,2	29,9	48,5	1.149	0,17	1,00	99	44	71	33,58	48,52
30	29,9	0,0	14,9	0	0,00	1,00	44	0	22		14,94
				6.580	1,00						

Tabla 7. Estadística de los valores tomados de la central

En la siguiente gráfica se puede observar cómo se presenta la recurrencia del caudal según los datos reportados estadísticamente.

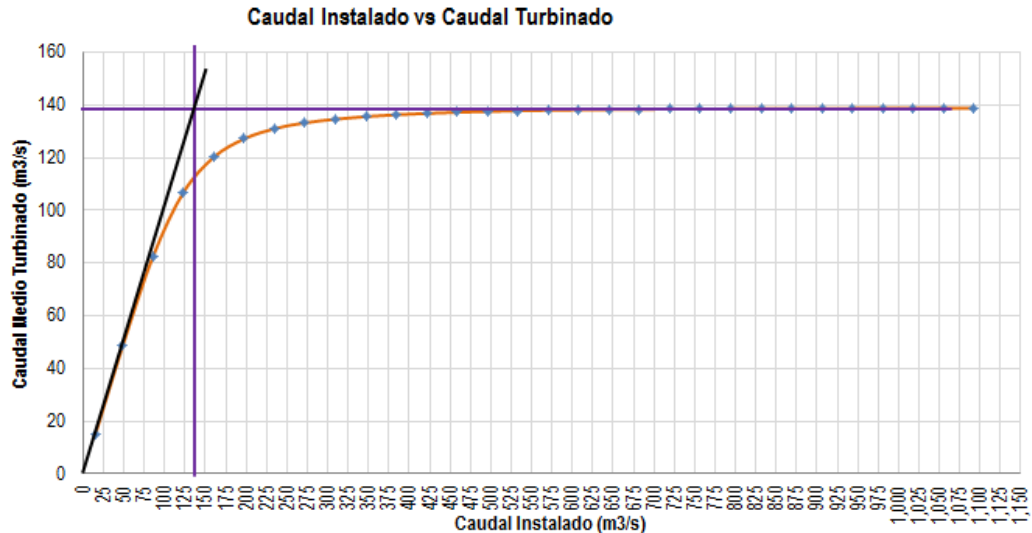


**Gráfico 48.** Curva de permanencia del caudal. [Por el autor]



Esta gráfica puede interpretarse como el porcentaje del tiempo que los caudales muestran un valor determinado. Por ejemplo, se puede afirmar que el 70% del tiempo los caudales superan los 100 m<sup>3</sup>/s o que el 10% del tiempo los caudales superan los 200 m<sup>3</sup>/s.

Como resultado de este análisis se encuentra que el caudal representativo o de diseño óptimo del emplazamiento es de 137.5 m<sup>3</sup>/s; es decir, la central debería tener una caudal nominal igual a este valor dado que caudales superiores no aportan de manera significativa a la producción de la potencia de la central, tal como se observa en la tabla 6 anterior. [74] A continuación se muestra gráficamente esta condición.



**Gráfico 49.** Curva de capacidad óptima del sistema de generación

#### 4.4 Aplicación a la estimación de producción de electricidad. [Por el autor]

Los datos obtenidos en la corrida de la herramienta de análisis de Wavelet y el tratamiento de los mismos aplicados a la producción de la energía eléctrica se presentan en conjunto para establecer una diferencia.

##### 4.4.1 Análisis del emplazamiento con los datos obtenidos con Wavelet

Aplicando la representación Wavelet de la serie de caudales y aplicando el tratamiento estocástico se obtienen los siguientes resultados:

Altura Total del emplazamiento [Ht] (m):	150
------------------------------------------	-----

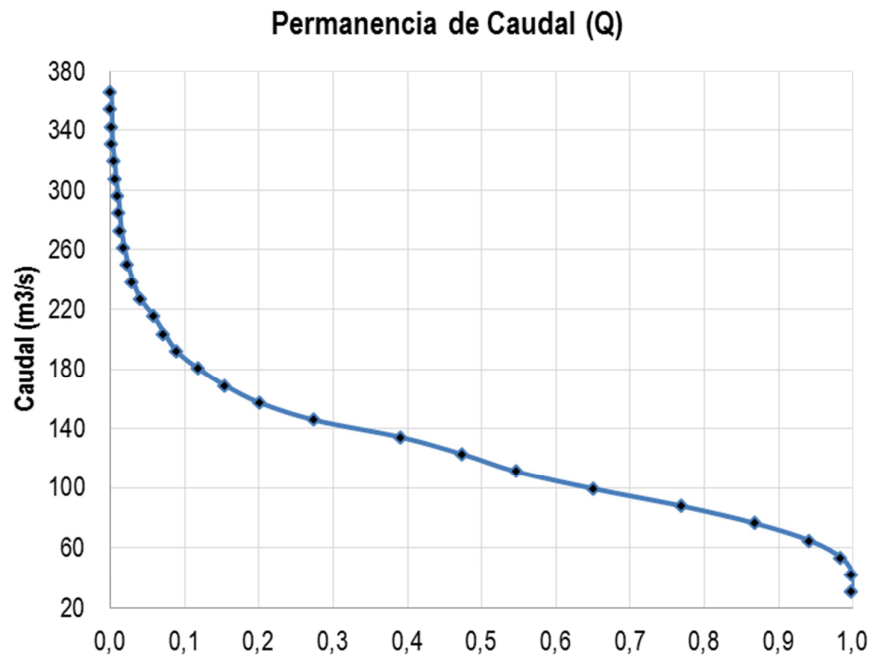
Años (n)	Datos (D)	Clases $N=1+3.3*\ln(D)$	Qmáx	Qmín	(AC) [Qmax-	$\Delta$ de Pot (MW) [9.8 * Ht * AC]
0	6580	30	371,0	35,8	11,56	16,99

Tabla 8. Datos de análisis de emplazamiento con Wavelet

Clase	Qmáx	Qmín	Qmed	Ocurrencia	Frec. (p.u)	Permanencia	Pmáx	Pmín	Pmed	$\Delta$ Caudal	Qt
1	371,0	359,4	365,2	10	0,00	0,00	545,36	528,37	536,87	0,01	125,81
2	359,4	347,9	353,7	4	0,00	0,00	528,37	511,38	519,87	0,03	125,80
3	347,9	336,3	342,1	4	0,00	0,00	511,38	494,38	502,88	0,03	125,77
4	336,3	324,8	330,5	3	0,00	0,00	494,38	477,39	485,89	0,05	125,74
5	324,8	313,2	319,0	19	0,00	0,01	477,39	460,40	468,89	0,08	125,68
6	313,2	301,6	307,4	11	0,00	0,01	460,40	443,40	451,90	0,11	125,60
7	301,6	290,1	295,9	22	0,00	0,01	443,40	426,41	434,91	0,14	125,49
8	290,1	278,5	284,3	13	0,00	0,01	426,41	409,42	417,91	0,16	125,35
9	278,5	267,0	272,7	14	0,00	0,02	409,42	392,42	400,92	0,20	125,19
10	267,0	255,4	261,2	26	0,00	0,02	392,42	375,43	383,93	0,25	124,99
11	255,4	243,8	249,6	34	0,01	0,02	375,43	358,44	366,93	0,32	124,74
12	243,8	232,3	238,1	46	0,01	0,03	358,44	341,44	349,94	0,42	124,42
13	232,3	220,7	226,5	67	0,01	0,04	341,44	324,45	332,95	0,58	124,00
14	220,7	209,2	214,9	117	0,02	0,06	324,45	307,46	315,95	0,77	123,42
15	209,2	197,6	203,4	95	0,01	0,07	307,46	290,46	298,96	0,95	122,65
16	197,6	186,0	191,8	108	0,02	0,09	290,46	273,47	281,97	1,21	121,70
17	186,0	174,5	180,3	192	0,03	0,12	273,47	256,48	264,97	1,59	120,49
18	174,5	162,9	168,7	242	0,04	0,16	256,48	239,48	247,98	2,07	118,90
19	162,9	151,4	157,1	307	0,05	0,20	239,48	222,49	230,99	2,77	116,83
20	151,4	139,8	145,6	486	0,07	0,28	222,49	205,50	213,99	3,87	114,05
21	139,8	128,2	134,0	765	0,12	0,39	205,50	188,50	197,00	5,02	110,19
22	128,2	116,7	122,5	548	0,08	0,48	188,50	171,51	180,01	5,92	105,16
23	116,7	105,1	110,9	470	0,07	0,55	171,51	154,52	163,01	6,93	99,25
24	105,1	93,6	99,3	683	0,10	0,65	154,52	137,52	146,02	8,22	92,32
25	93,6	82,0	87,8	781	0,12	0,77	137,52	120,53	129,03	9,47	84,10
26	82,0	70,4	76,2	652	0,10	0,87	120,53	103,54	112,04	10,47	74,63
27	70,4	58,9	64,7	485	0,07	0,94	103,54	86,55	95,04	11,14	64,15
28	58,9	47,3	53,1	278	0,04	0,99	86,55	69,55	78,05	11,47	53,01
29	47,3	35,8	41,5	98	0,01	1,00	69,55	52,56	61,06	11,56	41,53
30	35,8	24,2	30,0	0	0,00	1,00	52,56	35,57	44,06		29,97
				6.580	1,00						

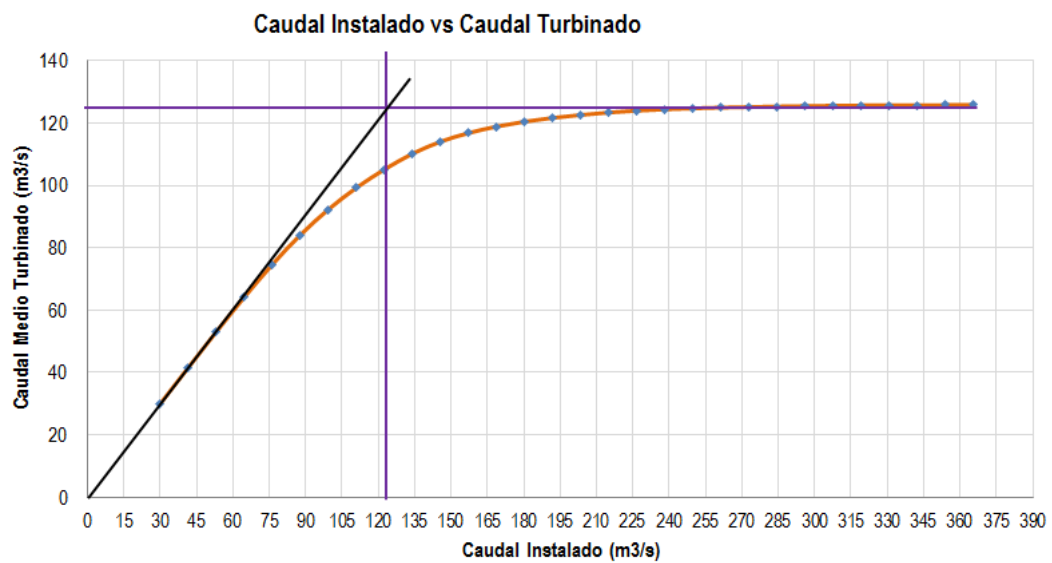
Tabla 9. Análisis de la representación Wavelet

Si se grafica la curva de permanencia se obtiene:



**Gráfico 50.** Curva de permanencia con datos entregados por Wavelet. [Por el autor]

Aplicando la metodología descrita en el numeral 4. 3.5 anterior se encuentra que el caudal óptimo representativo para el análisis energético es de 122 m³/s, conforme se expresa en el siguiente gráfico:



**Gráfico 51.** Nueva Curva de capacidad del sistema de generación. [Por el autor]

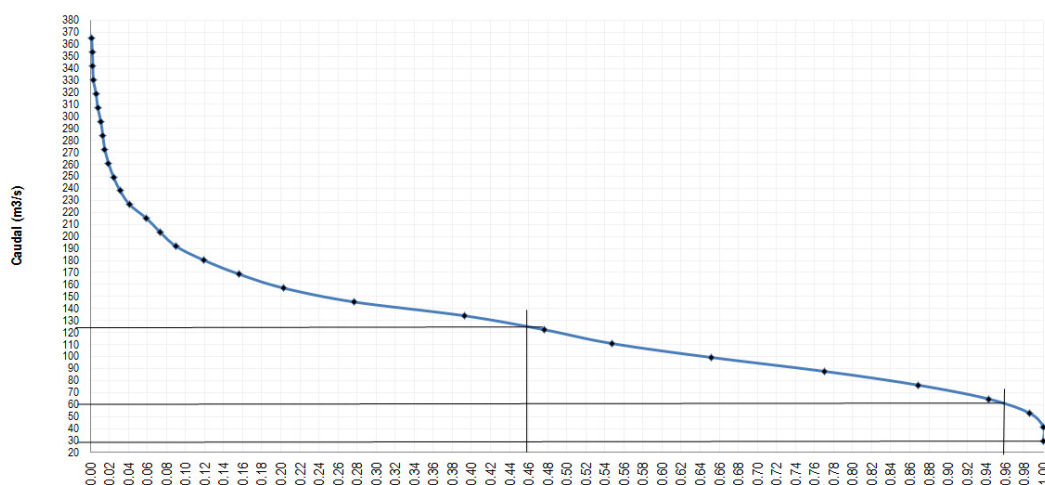
Para la estimación de la generación se establece el cálculo con los nuevos datos obtenidos, donde se obtiene los siguientes resultados:

Análisis Energético Señal Wavelet	Q > 122	61 < Q < 122	24.4 < Q < 61
Caudal Medio [Qm] (m3/s):	122	91.5	42.7
Duración (p.u)	0.465	0.485	0.05
Rendimiento Tubería (170 m) (p.u)	0.98	0.98	0.98
Rendimiento Turbina (p.u)	0.92	0.92	0.92
Rendimiento Generador (p.u)	0.94	0.94	0.94
Rendimiento Sistema Eléctrico (p.u)	0.95	0.95	0.95
Potencia Media (MW)	179.34	134.51	62.77
Lavados de embalse (p.u)	0.034	0.034	0.034
Energía Generada (GWh/año)	568.17	444.45	21.38
<b>Energía Total (GWh/año)</b>	<b>1,034</b>		

Tabla 10. Cálculos de caudal y estimación de energía

En la tabla anterior, en la primera columna se realiza el análisis de producción de electricidad de la central para aquellos caudales iguales o superiores al caudal óptimo estimado. En la segunda columna se estima la producción de energía para los caudales que permitiría operar una turbina a caudal nominal y la otra a caudales inferiores al caudal nominal, considerando que la central posee dos turbinas y que el caudal óptimo (122 m3/s) se reparte entre las dos. En la tercera columna se realiza el análisis energético para la operación de una unidad desde el caudal nominal hasta el caudal mínimo, que se ha considerado igual al 40% del caudal nominal considerando una turbina Francis.

Los valores de Duración en por unidad se obtienen gráficamente de la curva de permanencia, conforme se muestra en la siguiente figura:



**Gráfico 52.** Determinación de la duración de caudales. [Por el autor]

Para el análisis también se consideran los rendimientos estándar de la turbina, tuberías, generador, sistema eléctrico y la influencia promedio de los lavados de embalse propios de la Central Agoyán.

Con estas consideraciones, la energía para cada segmento de caudal se determina como:

$$E = 9.8 \times Q_{\text{medio}} \times \text{Altura} \times 8760 \text{ h / año} \times \text{Duración} \times \text{Rend. Tub} \times \text{Rend. Turb} \times \text{Rend. Gen.} \times \text{Rend. Sist, Elect} \times (1 - \text{Lavado Emb.})$$

#### 4.4.2 Comparación de datos de estimación energética

Aplicando el procedimiento descrito en el numeral 4.4.1 anterior pero a la serie estadística normal, sin tratamiento Wavelet, se obtienen los siguientes resultados:

	Q > 137.5	68.75 < Q < 137.5	27.5 < Q < 68.75
Caudal Medio [Qm] (m³/s):	137.5	91.5	42.7
Duración (p.u)	0.39	0.545	0.065
Rendimiento Tubería (170 m) (p.u)	0.98	0.98	0.98
Rendimiento Turbina (p.u)	0.92	0.92	0.92
Rendimiento Generador (p.u)	0.94	0.94	0.94
Rendimiento Sistema Eléctrico (p.u)	0.95	0.95	0.95
Potencia Media (MW)	202.13	134.51	62.77
Lavados de embalse (p.u)	0.034	0.034	0.034
Energía Generada (GWh/año)	537.07	499.44	27.80
<b>Energía Total (GWh/año)</b>	<b>1,064</b>		

Tabla 11. Energía eléctrica anual – serie histórica

Aquí, los valores de caudales referenciales para cada columna de la tabla anterior varían debido a que el caudal óptimo obtenido en el numeral 4.3.5 anterior fue de 137.5 m<sup>3</sup>/s, resultado de lo cual la energía anual estimada es superior a la obtenida

#### 4.4.3 Resultados de los últimos años de energía eléctrica obtenida.

Comparando los resultados obtenidos aplicando las dos metodologías descritas anteriormente con la estadística de producción medida se obtienen los siguientes resultados:

Energía	GWh			% Diferencia	
	Real	Wavelets	Estadístico	Wavelets	Estadístico
Año 2011	934	1.034	1.064	5,9%	9,0%
Año 2012	983				
Año 2013	1.012				
Año 2014	975				
Promedio	976				

Tabla 12. Datos estadísticos a partir del 2011

Como se observa, la aproximación energética empleando la serie de caudales descompuesta con Wavelets se aproxima mejor a la producción real de la central.

## **5 CONCLUSIONES.**

La Wavelet madre que arroja mejores resultados para la representación de la serie de caudales bajo estudio es la de Meyer.

Es factible emplear la descomposición de Wavelet en el cálculo del caudal óptimo de diseño y la estimación energética de la producción de centrales de pasada.

Sin perjuicio de lo anterior, la representación de Wavelet no debería emplearse para la determinación de los caudales máximos a los que estará sometida la central, debido a que éstos son filtrados en el proceso de aproximación Wavelet, pudiéndose cometer gruesos errores en el diseño estructural que podrían llevar al colapso de la central.

Los efectos climáticos y sus componentes aleatorios, hacen que los datos que el caudal sea un sistema dinámico, no lineal y no estacionario.

La Transformada de Wavelet es una herramienta matemática poderosa para el análisis de cualquier señal, desde su árbol de descomposición permite dividir la señal original en sub señales de diferentes rangos de frecuencias e intervalos de tiempo.

Un mayor nivel de descomposición no siempre nos presentara una señal adecuada, mejores resultados o buen análisis, todo depende del caso de estudio que se vaya a realizar.

El modelo basado en la transformada de Wavelet reproduce con mayor idoneidad las principales características estadísticas de los datos históricos observados.

El análisis multiresolución surge gracias al descubrimiento de Mallat en la Transformada Wavelet Discreta, demostró que cualquier onda puede ser descompuesta en dos categorías denominados los coeficientes de aproximación y los coeficientes de detalle.

## **6 RECOMENDACIONES**

Es recomendable investigar para cada emplazamiento en particular la mejor Wavelet madre aplicable, dado que cada serie es particular y podrían presentarse desvíos importantes.

Sería interesante realizar varias corridas con diferentes muestras para encontrar la cantidad de datos mínima requerida para tener un resultado aceptable.

Trabajos futuros deberán abordar el pronóstico de caudales empleando la señal descompuesta a través de Wavelet y aplicando por ejemplo modelos autoregresivos como AR o ARIMA.



## 7 REFERENCIAS

- [1] D. F. C. Aranda, Procesos del sistema hidrológico, México: Universidad Autónoma de San Luis, 1998.
- [2] J. M. Orrego, ELECTRICIDAD I TEORIA BÁSICA Y PRÁCTICAS, MARCOMBO Ediciones Técnicas, 2008.
- [3] European Small Hydropower Association - ESHA, Guía para el desarrollo de una pequeña central hidroeléctrica, 2006.
- [4] MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO - ESPAÑA, *MAPA DE CAUDALES MAXIMOS*, 2011.
- [5] UNIVERSIDAD CENTROAMERICANA JOSE SIMEON CAÑAS, «<http://cef.uca.edu.sv>,» 12 2011. [En línea]. Available: [http://cef.uca.edu.sv/descargables/2011\\_12\\_cursoMAGMA/pequenas\\_centrales\\_hidroelectricas.pdf](http://cef.uca.edu.sv/descargables/2011_12_cursoMAGMA/pequenas_centrales_hidroelectricas.pdf). [Último acceso: 26 10 2014].
- [6] INHAMI, «Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología,» [En línea]. Available: <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/caudales-datos-historicos/>. [Último acceso: 05 11 2014].
- [7] IDAE, «<http://www.energiasrenovables.ciemat.es/>,» 2006. [En línea]. Available: [http://www.energiasrenovables.ciemat.es/adjuntos\\_documentos/Minicentrales\\_hidroelectricas.pdf](http://www.energiasrenovables.ciemat.es/adjuntos_documentos/Minicentrales_hidroelectricas.pdf). [Último acceso: 11 12 2014].
- [8] S. K. R. & R. M. M., «Tutorial introductorio a la Teoría de Wavelet,» *Técnicas modernas en automática*, p. 8, 2013.
- [9] N. N. & D. M. Orozco, «El uso de la Transformada Wavelet Discreta en la reconstrucción de señales senosoidales,» *Scientia et Technica*, vol. XIV, nº 38, p. 6, 2008.
- [10] O. C. y J. M. D. Robertson, «Wavelets and power system transients,» de *SPIE International symposium on optical engineering in aerospace sensing*, 1994.
- [11] P. Ribeiro, «Wavelet transform: an advanced tool for analysing non-stationary harmonic distortion in power system,» *IEEE ICHPS*, pp. 21-23, 1994.
- [12] V. Pham y K. Won, «Wavelet transform based algorithm for harmonic analysis of power system waveforms,» *IEE Proceeding of Generation, Transmission and Distribution*, vol. 146, nº 3, pp. 249-254, 1999.
- [13] V. Pham y K. Wong, «Antidistortion method for wavelet transform filter bank and nonstationary power system waveform,» *IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution*, vol. 148, nº 2, pp. 177-122, 2001.
- [14] V. Pham, K. Wong, N. Watson y J. Arrillaga, «Sub-harmonic state estimation in power system,» *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, vol. 2, pp. 1168-1173, 2000.
- [15] T. Zheng, E. Makran y G. A.A., «Power system transient and harmonic studies using wavelet transform,» *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 14, nº 4, pp. 1461-1468, 1999.
- [16] T. Zheng y E. B. Makran, «Wavelet representation of voltage flicker,» *Electric Power Systems Research*, vol. 48, nº 2, pp. 133-140, 1998.
- [17] J. Driesen, T. Van Craenenbroeck, R. Reekmans y D. Van Dommelen, «Analysing time-varying power system harmonics using wavelet transform,» *Conference*

- Proceeding IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference* , vol. 1, pp. 474-479, 1996.
- [18] R. Zhen, H. Qungu, G. Lin y H. Wenying., «A new methods for power system frequency tracking based on trapezoid wavelet transform,» *International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management* , vol. 2, pp. 364-369, 2000.
  - [19] S.-J. Huang y C.-T. Hsieh, «Application of continuous wavelet transform for study of voltage flicker- generated signals,» *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* , vol. 36, n° 3, pp. 133-140, 1998.
  - [20] M.-T. Chen y A. Sakis Melioupulos, «Wavelet- based algorithm for voltage flicker analysis,» *Proceeding Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power*, vol. 2, pp. 732-738, 2000.
  - [21] Y. Gu y M. Bollen, «Time-frequency and time-scale domain analysis of voltage disturbances,» *IEEE Transaction on Power Delivery* , vol. 15, n° 4, pp. 1279-1284, 2000.
  - [22] S. Santoso, E. Powers y W. Grady, «Electric power quality disturbance detection using wavelet transform analysis,» *IEEE-SP Proceeding of International Symposium on Time-Frequency and Time- Scale Analysis*, pp. 166-169, 1994.
  - [23] S. Santoso, E. Powers, W. Grady y P. Hofmann, «Power quality assessment via wavelet transform analysis.,» *IEEE Transactions Power on Delivery*, vol. 11, n° 2, pp. 924-930, 1997.
  - [24] S. Santoso, E. Powers, W. Grady y A. Parson, «Power quality disturbance waveform recognition using wavelet-based neural classifier. I. Theoretical foundation.,» *IEEE Transactions on Power Delivery* , vol. 15, n° 1, pp. 222-228, 2000.
  - [25] S. Santoso, P. E.J., W. Grady y P. A.C., «Power quality disturbance waveform recognition using wavelet-based neural classifier. II. Application.,» *IEEE Transactions Power on Delivery* , vol. 15, n° 1, pp. 229-235, 2000.
  - [26] S. Santoso, E. Powers y G. W.M., «Power quality disturbed data compression using wavelet transform methods.,» *IEEE Transactions Power on Delivery*, vol. 12, n° 3, pp. 1250-1257, 1997.
  - [27] J. Chung, P. E.J., W. Grady y S. Baht, «New robust voltage sag disturbance detector using an adaptive prediction error filter,» *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 1, pp. 512-517, 1999 .
  - [28] A. Gauda, M. Salama, M. Sultan y A. Chikhani, «Power quality detection and classification using wavelet-multiresolution signal decomposition,» *IEEE Transactions Power on Delivery* , vol. 14, n° 4, pp. 1469-1476, 1999.
  - [29] Z. Li, Y. Feng, J. Chen y X. Zhen, «Wavelet analysis used on UHF partial discharge detection in GIS (gas insulated substations),» *International Conference on Power System Technology* , vol. 1, pp. 163-166, 1998.
  - [30] S. Yao, S. Y.H., L. Zhang y X. Cheng, «Wavelet transform and neural networks for short term electrical load forecasting,» *Energy Conversion and Management* , vol. 41, n° 18, pp. 1975-1988, 2000.
  - [31] C. Huang y H. Yang, «Envolving Wavelet-based networks for short-term load forecasting,» *IEE Proceeding of Generation, Transmission and Distribution* , vol. 148, n° 3, pp. 222-228, 2001.

- [32] I. K. Yu, C. I. Kim y H. Song, «A Novel Short-Term Load Forecasting Thecnique Using Wavelet Transform Analysis,» *Electric Machine and Power Systems, Taylor & Francis Inc.*, pp. 537-549, 2000.
- [33] W.-K. Yoon y M. Devaney, «Power measurement using the wavelet transform,» *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* , vol. 47, n° 5, pp. 1205-1210, 1997.
- [34] W. K. Yoon y M. Devaney, «Reactive power measurement using the wavelet transform,» *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 49, n° 2, pp. 246-252, 2000.
- [35] E. Hamid y Z. Kawasaki, «Wavelet packet transform for RMS value and power measurment,» *IEEE Power Engineering Review* , vol. 21, n° 9, pp. 49-51, 2001.
- [36] F. Jiang, Z. Bo, M. Redfern, G. Weller, C. Z. y Dong Xinzhou, «Application of wavelet transform in trasient protection-case stud: bus bar protection,» de *IEE Seventh International Conference on Developments in Power System Protection*, 2001.
- [37] L. Youyi, D. Xizhou, Z. Bo, N. Chin y G. Yaozhang, «Adaptive reclosure using high frecuency fault trasients,» de *IEE Seventh International Conference on Developments in Power System Protection*, 2001.
- [38] O. Chaari, M. Meunier y F. Brouaye, «Wavelets: a new tools for the resonant grounded power distribution system relaying.,» *IEEE Transaction in Power Delivery*, vol. 11, n° 3, pp. 1301-1308, 1996.
- [39] F. Magnago y A. Abur, «Fault locations using wavelets,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, n° 4, pp. 1475-1478, 1998.
- [40] F. Magnago y A. Abur, «A new fault location technique for radial distribution system based on high frecuency signals,» *IEEE PowerEngineering Society Summer Meeting* , pp. 426-431, 1999.
- [41] F. Magnago y A. Abur, «Use of time delays between modal components in wavelet based fault location,» *International Journal of Electrical Power & Energy System*, vol. 22, n° 6, pp. 397-403, 2000.
- [42] P. Silveira, R. Seara y H. Zurn, «An approach using wavelet transform for fault type identification in digital relaying,» *IEEE Power Engineering Society Meeting*, vol. 2, pp. 937-942, 1999.
- [43] W. Zhao, Y. Song y W. Chen, «Improved GPS travelling wave fault locator for power cables by using wavelet analysis,» de *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2001.
- [44] D. C. T. Wai y X. Yibin, «A novel technique for high impedance fault identification,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, n° 3, pp. 738-744, 1998.
- [45] M. Solanki, Y. Song, S. Potts y A. Perks, «Transient protection of transmission line using wavelet transform,» de *IEE Seventh International Conference on Development in Power system protection*, 2001.
- [46] W. Charytoniuk, W.-J. Lee, M.-S. Chen, J. Cultrera y T. Maffetone, «Arcing fault detection in underground distribution networks-feasibility study,» *IEEE Transactions on Industry Aplications*, vol. 36, n° 6, pp. 1756-1761, 2000.
- [47] T. Shi, H. Zhang, P. Liu, D. Zhang y Q. Wu, «Accelerated trip of power transmission line based on biorthogonal wavelet analysis,» *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting* , vol. 3, pp. 1333-1337, 2000.

- [48] I. Yu y Y. Song, «Development of novel adaptive single-pole autoreclosure schemes for extra high voltage transmission systems using wavelet transform analysis,» *Electric Power Systems Research*, vol. 47, n° 1, pp. 11-19, 1998.
- [49] Z. Ye y B. Wu, «Online rotor bar breakage detection of three phase induction motors by wavelet packet decomposition and artificial neural network,» de *IEEE 32nd Annual Conference on Power Electronics Specialists*, 2001.
- [50] L. Eren y M. Devaney, «Motor bearing damage detection via wavelet analysis of the starting current transient,» de *Proceeding of the 18th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2001.
- [51] W. Guopei, L. Guan, R. Zhen y H. Qungu, «A novel method for large turbine generator protection based on wavelet transformation,» de *International Conference on Advanced in Power System Control, Operation and Management*, 2000.
- [52] L. Tao, Y. Xianggeng y C. Deshu, «Study on wavelet analysis and its application to numeral protection for large synchronous generator,» de *Proceeding of International Conference on Power System Technology*, 1998.
- [53] F. Jiang, Z. Bo, P. Chin, M. Redfer y Z. Chen, «Power transformer protection based on transient detection using discrete wavelet transform (DWT),» *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, vol. 3, pp. 1856-1861, 2000.
- [54] P. Mao y R. Aggarwal, «A novel approach to the classification of the transient phenomena in power transformers using combined wavelet transform and neural network,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 16, n° 4, pp. 654-660, 2001.
- [55] D. Robertson, O. Camps, J. Mayer y W. Gish, «Wavelets and electromagnetic power system transients,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, n° 2, pp. 1050-1058, 1998.
- [56] Galli, A. Wayne, G. T y Heydt, «Analysis of electrical transients in power system via a novel wavelet recursion method,» *Thesis at Purdue University graduate School*, 1997.
- [57] G. Heydt y A. Galli, «Transient power quality problem analyzed using wavelet,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, n° 2, pp. 908-915, 1998.
- [58] A. Meliopoulos y C. H. Lee, «An alternative method for transient analysis via wavelets,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, n° 1, pp. 114-121, 2000.
- [59] A. Abur, O. Ozgun y F. Magnago, «Accurate modeling and simulation of transmission line transient using frequency depend modal transformations,» *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, vol. 3, pp. 1443-1448, 2001.
- [60] F. Magnago y A. Abur, «Wavelet-based simulation of transients along transmission lines with frequency dependent parameters,» *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 2, pp. 689-694, 2000.
- [61] R. M. d. C. Fernández, «<http://www.uta.cl>,» [En línea]. Available: [http://www.uta.cl/hdiaz/Documents/Fundamentos\\_Wavelets.pdf](http://www.uta.cl/hdiaz/Documents/Fundamentos_Wavelets.pdf). [Último acceso: 10 11 2014].
- [62] M. Misiti, Y. Misiti, G. Oppenheim y J.-M. Poggi, «Wavelet Toolbox™ 4 User's Guide,» *The Mathworks Inc.*, p. 53, 2009.
- [63] S. B. Vadillo, «E-reading Trabajos y Proyectos fin de estudios de la E.T.S.I.,» Universidad de Sevilla, Julio 2007. [En línea]. Available: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11511/fichero/PFC+Silvia+Blasco+Vadillo%25>

- 2FCap%C3%ADtulo+9++Anexo+2.pdf. [Último acceso: 12 12 2014].
- [64] L. A. Martínez, «Universidad Politécnica de Valencia,» Mayo 2009. [En línea]. Available: <http://www.dsic.upv.es/docs/bib-dig/tesis/etd-05152009-123504/phd.pdf>. [Último acceso: 15 12 2014].
- [65] «Stackoverflow,» 23 12 2012. [En línea]. Available: <http://stackoverflow.com/questions/12684277/multiresolution-discrete-wavelet-3d-plot-in-matlab>. [Último acceso: 20 12 2014].
- [66] Mathworks, «Mathworks,» [En línea]. Available: <http://es.mathworks.com/products/datasheets/pdf/wavelet-toolbox.pdf>. [Último acceso: 20 Enero 2015].
- [67] J. G. d. Jalon, J. I. Rodríguez y J. Vidal, «El programa Matlab,» de *Aprenda Matlab7.0 Como si estuviera en primero*, Madrid, Universidad Politécnica de Madrid, 2005, p. 3.
- [68] D. d. Matemáticas, «PENTAGONO,» [En línea]. Available: [http://pentagono.uniandes.edu.co/tutorial/Matlab/tutorial\\_matlab.pdf](http://pentagono.uniandes.edu.co/tutorial/Matlab/tutorial_matlab.pdf). [Último acceso: 10 Enero 2015].
- [69] DECSAI, «Departamento de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial,» 2013-2014. [En línea]. Available: <http://elvex.ugr.es/decsai/iaio/lab/matlab.pdf>. [Último acceso: 10 Enero 2015].
- [70] CELEC, «CORPORACION ELECTRICA DEL ECUADOR, CELEC,» [En línea]. Available: [https://www.celec.gob.ec/hidroagoyan/index.php?option=com\\_content&view=article&id=168&Itemid=416](https://www.celec.gob.ec/hidroagoyan/index.php?option=com_content&view=article&id=168&Itemid=416). [Último acceso: 20 Febrero 2015].
- [71] F. O. P. Ramírez, Introducción a las series de tiempo. Métodos paramétricos., 1 ed., Medellín: Universidad de Medellín, 1997, p. 75.
- [72] J. A. H. Quispe, *UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTIN*, Arequipa, 2013.
- [73] J. Cadavid y J. Salazar, «Generación de series sintéticas de caudales usando un modelo matemático con medias condicionadas,» *Avances en Recursos Hidráulicos*, , pp. 17-24, 2008.
- [74] G. L. T. Filho y Â. S. Júnior, «PROCEDIMENTOS PARA DIMENSIONAMENTO BÁSICO DE PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS,» de *Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas - CERPCH.*, Itajubá, 2011.
- [75] F. M. P. Granados, «Desarrollo tecnológico en la historia de la humanidad: Inventores e inventos. Tesla y las centrales hidroeléctricas,» *Revista Digital Innovación y Experiencia Educativa*, nº N° 26, p. 10, 2010.

## 8 ANEXOS

### 8.1 Resumen Mensual de Caudales

m3/s	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom.
1997	65.98	135.00	108.97	103.93	165.81	89.27	195.39	121.10	85.93	72.39	114.17	109.58	113.96
1998	82.68	92.61	114.07	162.60	135.71	228.70	276.59	140.81	87.17	88.94	96.07	58.87	130.40
1999	78.74	114.86	126.06	265.83	189.84	183.57	162.84	193.45	125.20	118.35	47.47	85.06	140.94
2000	74.94	106.90	139.20	172.67	307.39	249.47	165.84	153.76	117.83	109.52	60.73	83.84	145.17
2001	78.81	97.07	82.06	134.70	113.45	249.27	145.19	169.94	100.12	65.35	64.19	66.71	113.90
2002	66.90	82.36	76.65	107.90	140.45	141.50	176.81	138.10	74.93	80.03	144.53	94.12	110.36
2003	71.58	85.50	90.61	97.60	161.52	142.03	141.45	89.48	77.00	69.75	67.90	103.23	99.80
2004	64.74	56.46	140.94	105.73	144.68	240.13	139.29	149.77	91.83	91.94	85.63	93.45	117.05
2005	55.32	88.96	123.45	194.77	103.97	172.60	125.42	78.52	73.33	54.84	66.23	86.32	101.98
2006	73.89	98.21	103.48	119.97	108.26	159.63	108.22	132.03	155.10	69.10	89.77	98.77	109.70
2007	95.39	59.29	100.00	152.27	138.42	406.30	88.84	186.35	123.57	82.52	122.07	86.74	136.81
2008	101.35	139.07	136.87	146.63	162.42	187.40	203.23	139.45	141.93	137.61	116.40	90.84	141.93
2009	119.84	126.18	83.87	116.67	105.23	191.67	186.35	121.19	76.07	68.87	52.40	49.10	108.12
2010	64.06	83.75	67.00	111.30	131.94	155.27	118.42	111.29	80.20	68.87	100.10	103.69	99.66
2011	90.06	101.89	66.58	158.40	167.10	159.40	243.32	104.06	136.90	73.52	69.57	147.94	126.56
2012	125.94	140.66	132.74	140.10	144.06	129.23	148.06	135.29	97.37	87.52	70.93	69.16	118.42
2013	125.45	107.50	111.29	100.13	109.40	136.13	195.55	134.74	110.10	82.35	64.63	63.94	111.77
2014	88.97	59.04	114.81	166.73	169.42	244.20	190.26	166.13	117.07	125.87	76.93	88.97	134.03
2015	92.43												92.43
Prom.	85.11	98.63	106.59	142.11	149.95	192.54	167.28	136.97	103.98	85.96	83.87	87.80	119.90

Tabla 13. Resumen de datos

## 8.2 Consideraciones para el rendimiento.

# Potencia Eléctrica entregada al sistema

$$P_{ELE} = g \cdot Q \cdot H \cdot \eta_{CA} \cdot \eta_{CO} \cdot \eta_{TU} \cdot \eta_{GE} \cdot \eta_{TR} \cdot \eta_{DT}$$

**Tabela: Rendimiento típico del sistema de aducción (canal, tuberías, válvulas e desvíos).**

Cubrimiento del Sistema de Aducción (L)	Rendimiento Porcentual
L < 80 [m]	99
80 < L < 320 [m]	98
L > 320 [m]	97

Potencia de la Central [kW]	Rendimiento de la Turbina [%]	Rendimiento del Generador [%]
Até 10	70 a 80	90
10 a 50	80 a 83	90
50 a 100	83 a 86	92
100 a 500	86 a 88	92
500 a 1000	88 a 92	94

**Rendimientos típicos de transformadores y líneas de distribución**

Equipamento	Rendimiento Típico [%]
Transformador	93 a 95
Línea de Distribución	94 a 96

### 8.3 Datos de lavado de embalse.

Potencia de la Central [kW]	Rendimiento de la Turbina [%]	Rendimiento del Generador [%]
Até 10	70 a 80	90
10 a 50	80 a 83	90
50 a 100	83 a 86	92
100 a 500	86 a 88	92
500 a 1000	88 a 92	94

#### Rendimientos típicos de transformadores y líneas de distribución

Equipamento	Rendimiento Típico [%]
Transformador	93 a 95
Línea de Distribución	94 a 96

Promedio Anual: 15 lavados  
 h / lavado: 20  
 Tiempo anual: 300 horas  
 % Anual 3,4%

**OBJETIVO :** Desalojar sedimentos que puedan comprometer la operación normal. Ejecución hasta los 6 metros de altura de sedimentos.  
**FRECUENCIA:** Estacional. El promedio anual de lavados es de 22 con una duración de 20 H. c/u.



#### 8.4 Corrida de datos con otro tipo de familias Wavelet.

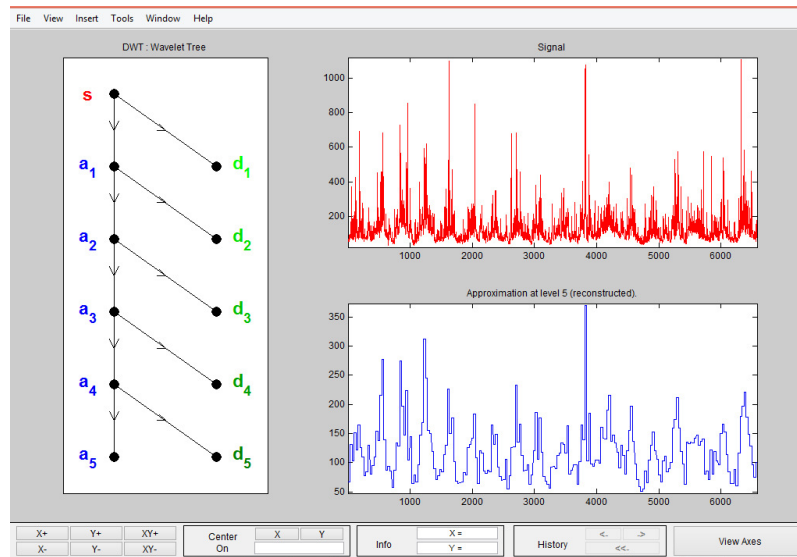


Gráfico 53: Wavelet Haar. [Por el autor]

Si se puede observar aquí los datos se pierden y la curva no está bien definida.

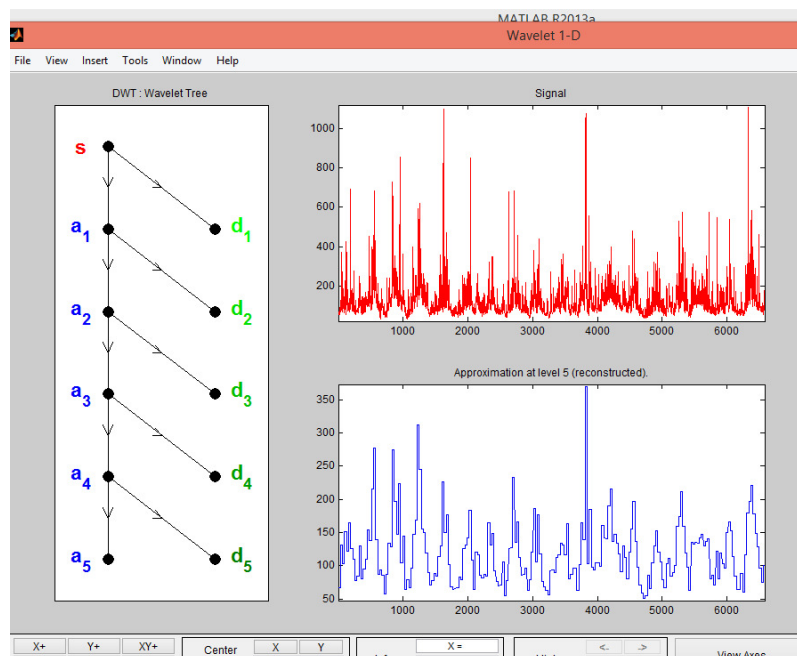
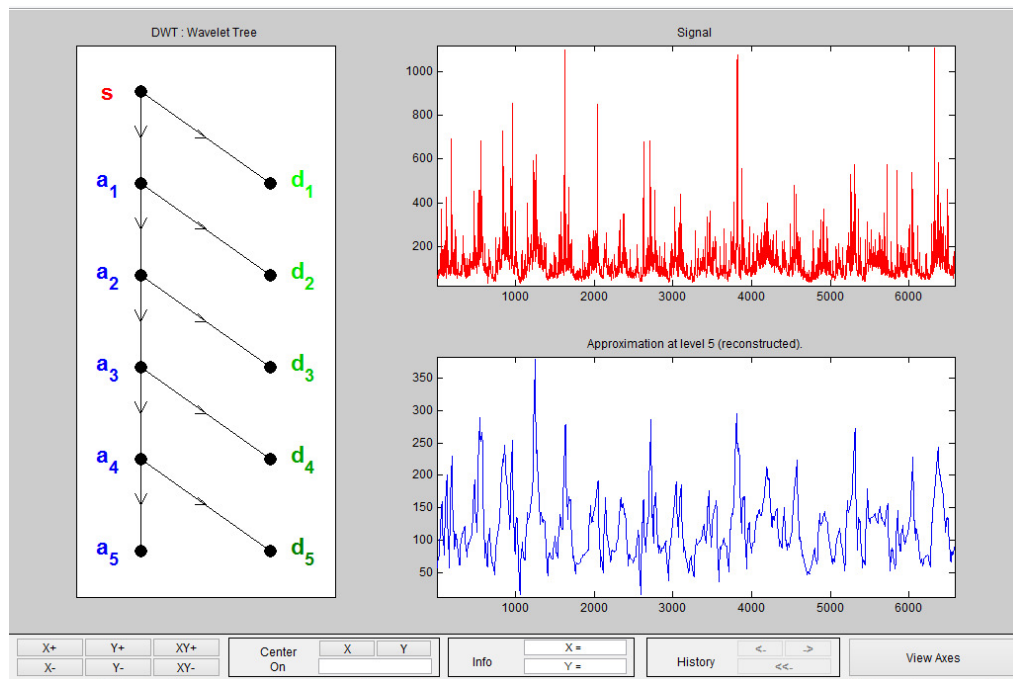


Gráfico 54. Wavelet Daubechies. [Por el autor]

Al igual que la descomposición anterior no se obtiene buenos resultados



**Gráfico 55.** Wavelet Symmlets. [Por el autor]

Ya con este tipo de familia se puede observar cambios en el tratamiento de la señal.

Se probaron las familias conocidas para este análisis, la más adecuada fue la entregada por la familia Wavelet Meyer tal como se mostró en el análisis propuesto.